

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності _____ *153 «Мікро- та наносистемна техніка»*
(код і назва)

на тему: «Сенсор теплофізичних параметрів газового середовища за технологією MEMS»

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ДП-61м
(шифр групи)

Дудка Михайло Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н. Орлов Анатолій Тимофійович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.т.н. Орлов А.Т.

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В.

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з
праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Работа выполнена на 80 страницах, содержащих 4 главы, 37 иллюстрации и 41 источник в перечне ссылок.

Объектом исследования в работе являются сенсоры теплофизических параметров газовой среды и жидкости, разработанные с использованием микроэлектронной технологии микро-электро-механических систем (МЭМС) на кремнии.

Предметом исследования являются конструкции первичных терморезисторных преобразователей, физические принципы их функционирования, вторичные преобразователи к ним, реализованные с использованием платформы для разработки виртуальных лабораторных приборов NI ELVIS II в программной среде LabVIEW.

Целью работы является разработка многофункционального сенсора теплофизических параметров газовой среды с использованием разработанных по технологии МЭМС первичных преобразователей и платформы для разработки виртуальных лабораторных приборов NI ELVIS II в программной среде LabVIEW .

В первой главе приведен обзор литературы, анализ основных конструкций сенсоров, обзор платформы виртуальных лабораторных приборов NI ELVIS II.

Во втором разделе проведен обзор и анализ физических принципов работы терморезисторных преобразователей с использованием методов стационарного и динамического разогрева измерения теплофизических параметров газовых сред и жидкостей.

В третьем разделе разработана структурная схема много-функционального виртуального прибора для проведения измерений теплофизических параметров среды по методике статического и динамических теплообмена.

В четвертом разделе представлена разработка стартап проекта.

Ключевые слова: сенсор газового потока, МЭМС, теплопроводность, теплоёмкость.

РЕФЕРАТ

Робота виконана на 80 сторінках, що містять 4 розділи, 37 ілюстрації та 41 джерела в переліку посилань.

Об'єктом дослідження в роботі є сенсори теплофізичних параметрів газового середовища або рідини, спроектовані за мікроелектронною технологією мікро-електро-механічних систем (МЕМС) на кремнії.

Предметом дослідження є конструкції первинних терморезисторних перетворювачів, фізичні принципи їх функціонування, вторинні перетворювачі до них, реалізовані з використанням платформи для розробки віртуальних лабораторних приладів NI ELVIS II в програмному середовищі LabVIEW.

Метою роботи є розробка багатофункціонального сенсору теплофізичних параметрів газового середовища та рідини з використанням спроектованих за технологією МЕМС первинних перетворювачів та платформи для розробки віртуальних лабораторних приладів NI ELVIS II в програмному середовищі LabVIEW.

У першому розділі проведено огляд літератури за темою роботи, аналіз основних конструкцій сенсорів, огляд платформи для розробки віртуальних лабораторних приладів NI ELVIS II.

В другому розділі проведено огляд і аналіз фізичних принципів роботи терморезисторних перетворювачів з використанням методів стаціонарного і динамічного нагрівання для вимірювання теплофізичних параметрів газових середовищ та рідин.

В третьому розділі розроблено структурну схему багато-функціонального віртуального приладу для вимірювання теплофізичних параметрів середовища за методиками статичного і динамічного теплообміну.

В четвертому розділі було представлено розробку стартап проекту.

Ключові слова: датчик потоку газу, МЕМС, теплопровідність, теплоємність.

ABSTRACT

Thesis has done on 80 pages containing 4 chapters, 37 illustrations and 41 in the list of source references.

The object of the thesis is investigation of the environment with using microelectronic sensors, manufactured with using micro-electro-mechanical system technology (MEMS) on silicon.

The aim of the thesis is to develop a sensor block diagram of thermal parameters of gas environment on MEMS technology.

A literature review has carried out, the main structure, the physical principles of sensors, the overview of NI ELVIS II platform of virtual laboratory instruments are performed in the first chapter.

A review and analysis of traditional methods of measuring the steady-state and dynamic environments are performed in the second chapter.

The third section is the experimental part of the thesis. A block diagram of the gas and liquids parameters measuring devices prospect creation and the measurement by the method of analysis of dynamic processes of heat transfer between the sensor fabricated by MEMS technology and environment are performed and presented in the third chapter.

In the fourth section was presented the development of the project startup.

Keywords: gas flow sensor, MEMS, thermal conductivity, heat capacity.

Содержание

Перечень сокращений	8
Вступление	9
1. Литературный обзор	11
1.1. Основные конструкции и физические принципы работы первичных преобразователей газового потока	11
1.1.1. Физические принципы работы	11
1.1.1.1 Описание Поведения Теплового Расходомера	12
1.1.2 Основные конструкции первичных преобразователей	16
1.1.2.1. Зарегистрированные патенты	16
1.1.2.2. Преобразователи производства компании Honeywell	22
1.1.2.2.1 Первичные преобразователи с милливольтным выходным сигналом ..	23
1.1.2.3 Преобразователи производства компании Sensirion	26
1.1.2.4 Первичные преобразователи производства компании SensorTechnics	30
1.1.2.5. Терморезисторные первичные преобразователи лаборатории медицинской сенсорики ФЭЛ НТУУ “КП”	32
1.2. Обзор структуры, интерфейса и функциональности платформы виртуальных лабораторных приборов NI ELVIS II.	34
1.2.1. Внешний вид и общая информация про прибор	34
1.2.1 Основные компоненты платы сбора данных	36
1.2.2. Обзор основных функциональных блоков платформы NI ELVIS II и их разъёмов	38
1.2.4. Конфигурация аналоговых входов	42
1.2.4.1. Заземленные источники сигнала	42
1.2.4.2 Плавающие (не заземленные) источники сигнала	43
1.2.5. Програмное обеспечение для DAQ-приборов	45
1.2.5.1. LabVIEW	45
1.2.5.2. SignalExpress	45
1.3. Вывод по литературному обзору	46

2.	Методы традиционного стационарного и динамического измерения сред.....	47
2.1.	Метод для определения стационарного и нестационарного распределения температуры	47
2.2.	Динамический метод измерения теплофизических характеристик среды.....	51
3.	Экспериментальная часть	53
3.1.	Разработка функциональной схемы измерительного прибора	53
3.1.1.	Функциональный генератор.....	54
3.1.1.	Осцилограф	55
3.1.3.	Электронная схема повторителя напряжения с усилением тока.....	56
3.1.4.	Структурная схема измерения теплофизических параметров среды с использованием ТРП.....	57
3.4.	Рекомендации к дальнейшему совершенствованию разработки.....	58
3.5	Вывод по экспериментальной части	58
4.	Разработка стартап проекта.....	58
4.1.	Описание идеи проекта	58
4.2.	Технологический аудит идеи проекта	60
4.3.	Анализ рыночных возможностей запуска стартап-проекта.....	61
4.4.	Разработка рыночной стратегии проекта	68
4.5.	Разработка маркетинговой программы стартап-проекта.....	70
4.6	Выводы по главе	73
	Основные результаты и выводы	74
	Перечень литературных источников:.....	76

Перечень сокращений

МЭМС- микро электромеханические системы и структуры

NI ELVIS II(NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series) — учебная платформа виртуальных лабораторных приборов

DAQ–пристрій(Data acquisition device) – устройство сбора данных

ТРП — терморезисторный преобразователь

КНИ — кремний на изоляторе

SOI — silicon on insulator

КМОП — комплементарная структура металл-оксид-полупроводник

CMOS — complementary metal-oxide semiconductor

Вступление

Значительную часть всех типов измерений, выполняемых в современных промышленности и науке, занимают измерения температуры. Среди средств измерения температуры значительное место занимают терморезисторные первичные преобразователи (ТРП), работа которых основана на однозначной связи их сопротивления с температурой. В последнее время ТРП изготавливаются по микроэлектронных технологий создания МЭМС, интегрируются с вторичными преобразователями на одном кристалле и отличаются многофункциональностью. Кроме непосредственного измерения температуры, современные ТРП широко используются для исследования физических параметров газа или жидкости - давления, объемного расхода, линейной скорости, химического состава среды и тому подобное. Методики проведения измерений предусматривают использование в составе первичного преобразователя активного нагревателя и используют физические процессы теплообмена между отдельными элементами ТРП, изготовленных по технологии МЭМС. Кроме традиционных методик анализа процессов стационарного теплообмена, на сегодняшний день актуальны методики, предусматривающие исследования переходных процессов установления термодинамического равновесия. Для проведения таких измерений разработано значительное количество разнообразных методик и конструкций микроэлектронных ТРП.

Целью данной работы является разработка многофункционального сенсора по технологии создания виртуальных измерительных приборов в среде графического программирования LabVIEW 8.6 на основе аппаратной платформы NI ELVIS II с использованием встроенных инструментов SignalExpress с перспективой разработки измерительного прибора и проведения экспериментальных исследований ТРП, изготовленных по технологии МЭМС, в подтверждение возможности их использования для измерения параметров газа или жидкости.

В ходе работы предусматривается решение следующих задач:

- анализ научно-технической литературы, анализ конструкций современных сенсоров на основе теплоизолированных структур;
- анализ методов определения теплофизических параметров сред с использованием первичных преобразователей на технологии МЭМС;
- разработка многофункционального сенсора для измерения теплофизических параметров среды на основе лабораторной платформы для разработки виртуальных устройств NI ELVIS II в среде программирования LabVIEW 8.6;
- формулирование рекомендации для дальнейшей разработки виртуального измерительного инструмента, проведения экспериментальных исследований и анализ их результатов.

1. Литературный обзор

1.1. Основные конструкции и физические принципы работы первичных преобразователей газового потока

1.1.1. Физические принципы работы

Тепловые первичные преобразователи массового расхода, по принципу работы, можно разделить на три основные категории: анемометрические, калориметрические и времяпролетные датчики.

Времяпролетные датчики массового расхода используют термоэлементы, установленные друг от друга на определенном расстоянии, и измеряя время пролета теплового импульса между двумя проводниками, можно определить скорость потока вещества.

Тем не менее, импульс будет деформироваться профилем скорости потока и в то же время будет расширяться за счет диффузии тепла, при продольном перемещении. То есть тепловой импульс может быть слишком широким для потоков с низкой скоростью.

Калориметрические первичные преобразователи расхода обычно состоят из нагревателя, окруженного чувствительными элементами, расположенными симметрично с обеих сторон. Подвижное вещество переносит тепло в направлении потока и, как следствие, изменится распределение температуры вокруг нагревателя. Выходной сигнал обычно снимается с помощью мостовой схемы Уитстона, в котором пара нисходящего и восходящего чувствительных элементов представляет собой два из четырех плеч моста. Выходной сигнал, который является мерой разности температур чувствительных элементов. Калориметрические первичные преобразователи расхода могут точно измерять потоки с крайне низкой скоростью. Тем не менее, калориметрические датчики расходов могут достигать насыщения при высоких скоростях потока.

Термоанемометрические первичные преобразователи потока состоят, как правило, из одного элемента, который разогревается. Измеряемой величиной

является потеря разогрева тепла, зависит от скорости потока вещества. Сигнал анемометра пропорционален квадратному корню из скорости потока. Этот тип первичных преобразователей массового расхода менее чувствительными для небольших потоков, однако данные устройства способны точно измерять потоки с большими скоростями. [1]

Первичные преобразователи расхода газа могут совмещать в себе несколько вышеприведенных принципов работы.

1.1.1.1 Описание Поведения Теплового Расходомера

Предложенный Кингом (L.V. King) в 1914 году анемометр с нитью накаливания (термоанемометр) представляет собой первое в своем роде устройство способное измерять поток жидкости с помощью тепловых датчиков. В термоанемометре, тонкая проволока электрически нагревается до температуры большей, чем температура окружающей среды. Окружающий поток охлаждает прибор до некоторой температуры. В силу известного соотношения между электрическим сопротивлением проволоки и ее температуры, скорость жидкости может быть определена, если измерить сопротивление проволоки.

Из-за своей непрочности, термоанемометры зачастую не подходят для промышленного использования, так как во многих случаях применения на практике встречаются загрязнения, которые могут вызвать повреждение этих хрупких устройств. Термоанемометры также считаются интрузивными устройствами, поскольку датчики не только измеряют свойства потока, но также нарушают его течение. Более жизнеспособным решением в таких случаях является использование теплового расходомера. Тепловой расходомер является неинтрузивным устройством (средством неразрушающего контроля), т. е., он не мешает течению потока. Применяя те же принципы, что и его предшественник, эти инструменты оснащены кожухом вокруг проводов, повышая свою долговечность, а также точность в измерении потока жидкости.

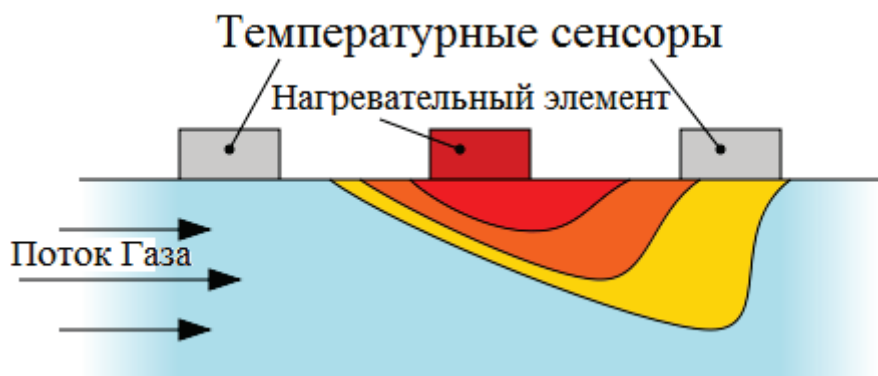


Рис. 1.1.1.1 Схематическое изображение теплового расходомера. [28]

Тепловые расходомеры широко используются для измерений газовых потоков в различных приложениях: от теплопередачи до химических реакций. Эти инструменты являются особенно востребованными в промышленности из-за их простой и надежной конструкции, так как они не содержат никаких движущихся частей.

Группа из Кембриджского университета использовала программный пакет COMSOL Multiphysics для разработки 3D-модели тепловых датчиков потока и анализа динамики работы компонент устройства.

Проект модели, используемой в исследовании, был основан на технологиях: кремний на изоляторе (КНИ), комплементарная структура металл-оксид-полупроводник (КМОП), МЭМС теплового потока (silicon on insulator (SOI), complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) MEMS thermal flow) тепловой датчик потока. Модель состоит из контрольной микросхемы, которая включает в себя пять параллельных металлических проводников полоскового типа. Проводник в центре, используется для повышения температуры устройства до 300°C. Все проводники можно использовать для определения температуры посредством соотношения между удельным сопротивлением металла и абсолютной температурой. Четырехпроводное измерение используется для получения значения сопротивления.

При изготовлении контрольного чипа, применялась технология глубокого реактивного ионного травления задней поверхности чипа для удаления кремниевой

подложки из-под чувствительных элементов. Такая процедура обработки резко уменьшила теплопроводность, наблюдаемую у нагревательного элемента, и, как следствие, значительно понизила мощность, требуемую для повышения температуры на желаемое значение

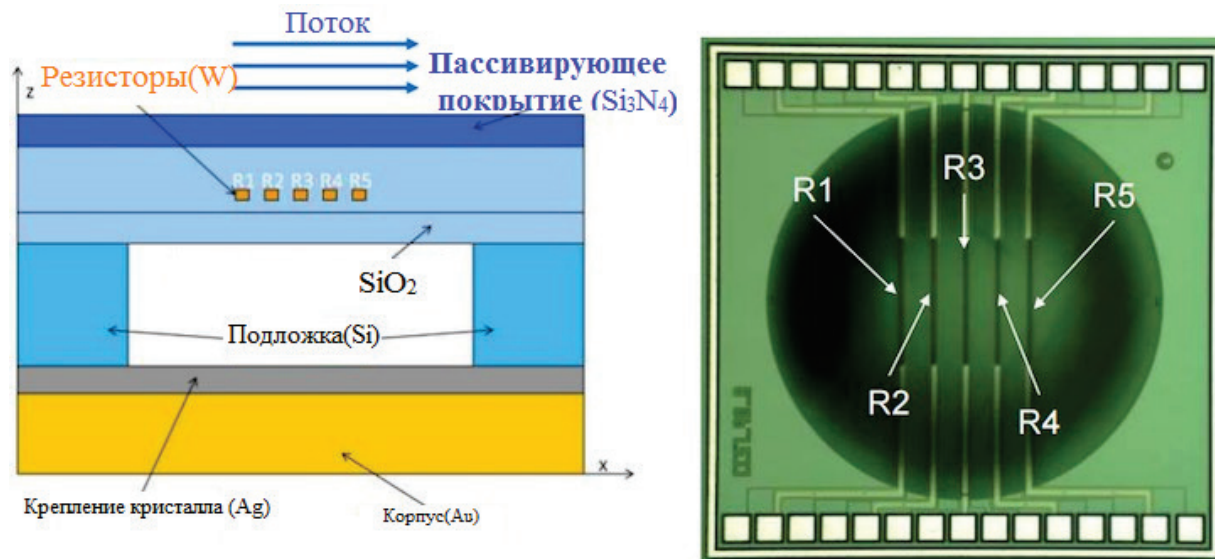


Рис. 1.1.1.2 Геометрия теплового датчика потока. На рисунке слева схематично показан поперечный срез контрольного устройства, изображение справа показывает вид сверху. [21]

В своем анализе, исследовательская группа объединила три различных области физики — электрический ток, теплопередача в твердых телах и ламинарное течение жидкости (газов) — для создания мультифизической модели. То есть ток смещения используется для локального нагрева компонентов, посредством эффекта Джоуля, после чего избыток тепла рассеивается в результате теплопроводности и конвекционного теплообмена. [28]

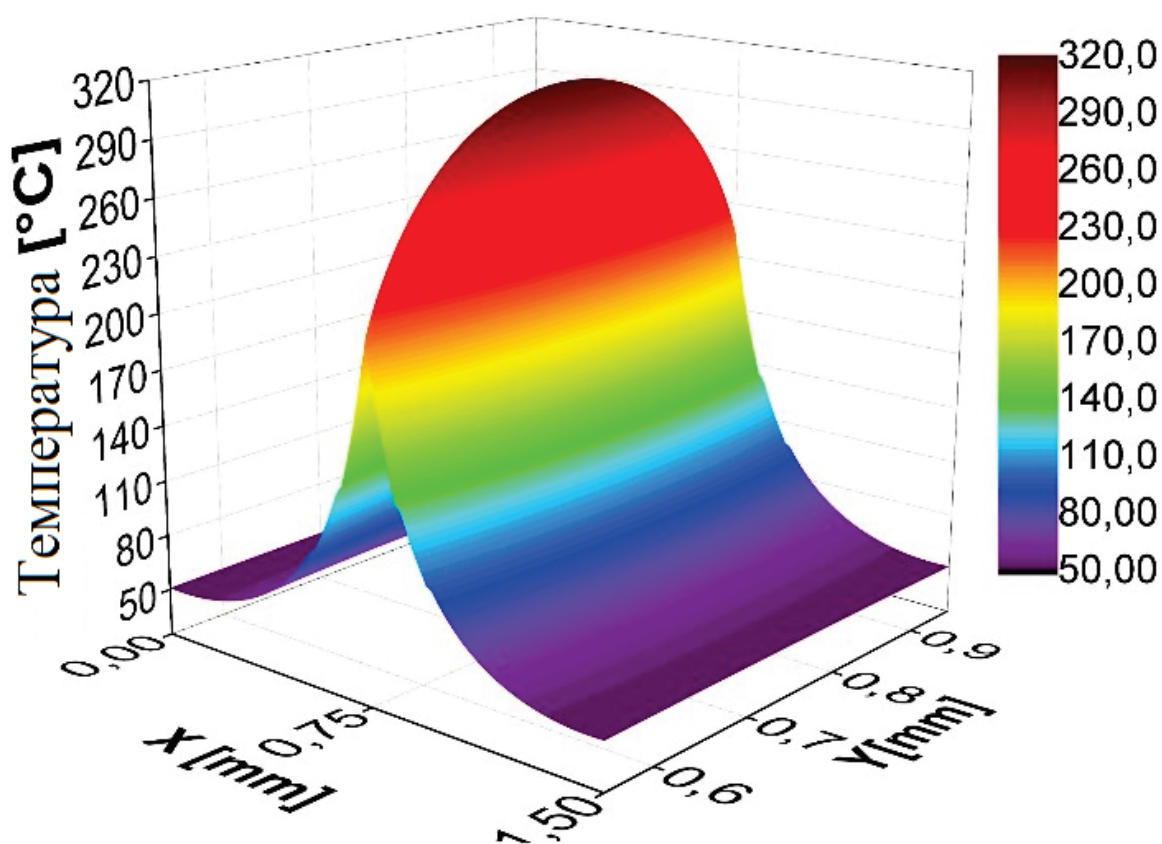


Рис 1.1.1.1.3 Распределение температуры в искомой области. [21]

1.1.2 Основные конструкции первичных преобразователей

1.1.2.1. Зарегистрированные патенты

Патент США №US8225652B2

Данный патент был опубликован 24 июля 2012 японскими изобретателями Манабу Мураока, Масаки Сео, Джуничи Мацуда и Масанори Анза. Устройство, описанное в данном патенте, представляет собой пару термочувствительных элементов с температурой выше, чем в среде над ними, задается разогревающим элементом (нагревателем). Работа первого блока для расчета расходов вещества предусматривает измерение разницы температур термочувствительных элементов. Он предназначен для измерений скорости потока в определенном установленном диапазоне и обеспечивает высокую точность. Работа второго блока основана на величине мощности, которая необходима разогрева для поддержания постоянной температуры в пространстве над ним. Во втором случае точность измерений ниже, однако, при высоких значениях скорости потока, первый блок может достигать насыщения, и измерения осуществляются вторым блоком. Если скорость потока вещества превышает установленный диапазон измерений для первого блока, в качестве источника выходного сигнала используется второй измерительный блок. [1]

Благодаря этому принципу достигается расширение диапазона измерений без применения отдельных термочувствительных элементов для малых и больших значений скорости потока газа

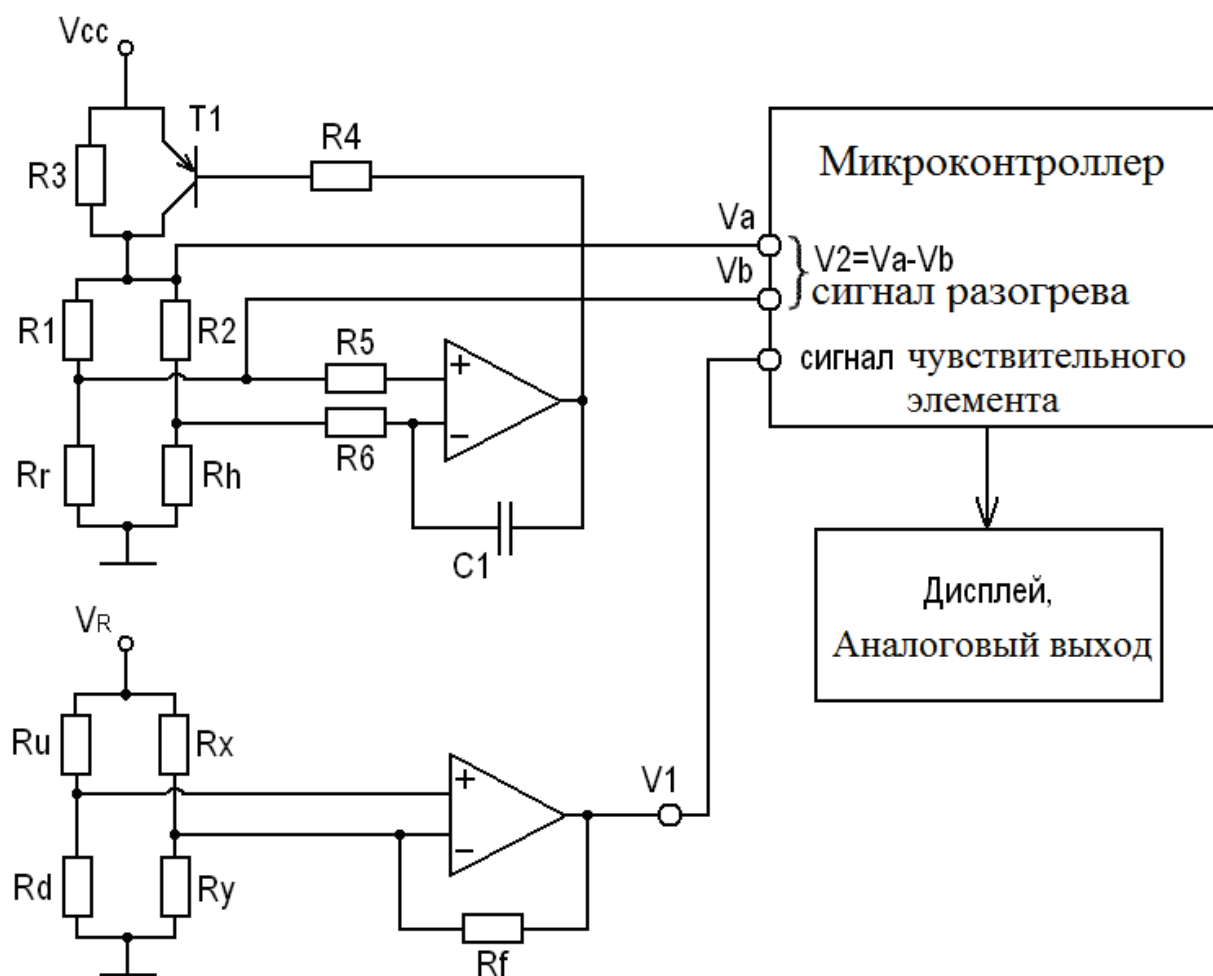


Рис 1.1.2.1.1. Схема электрическая принципиальная устройства для снятия измерительного сигнала [1]



Рис.1.1.2.1.2. Структура первичного преобразователя потерь [1]

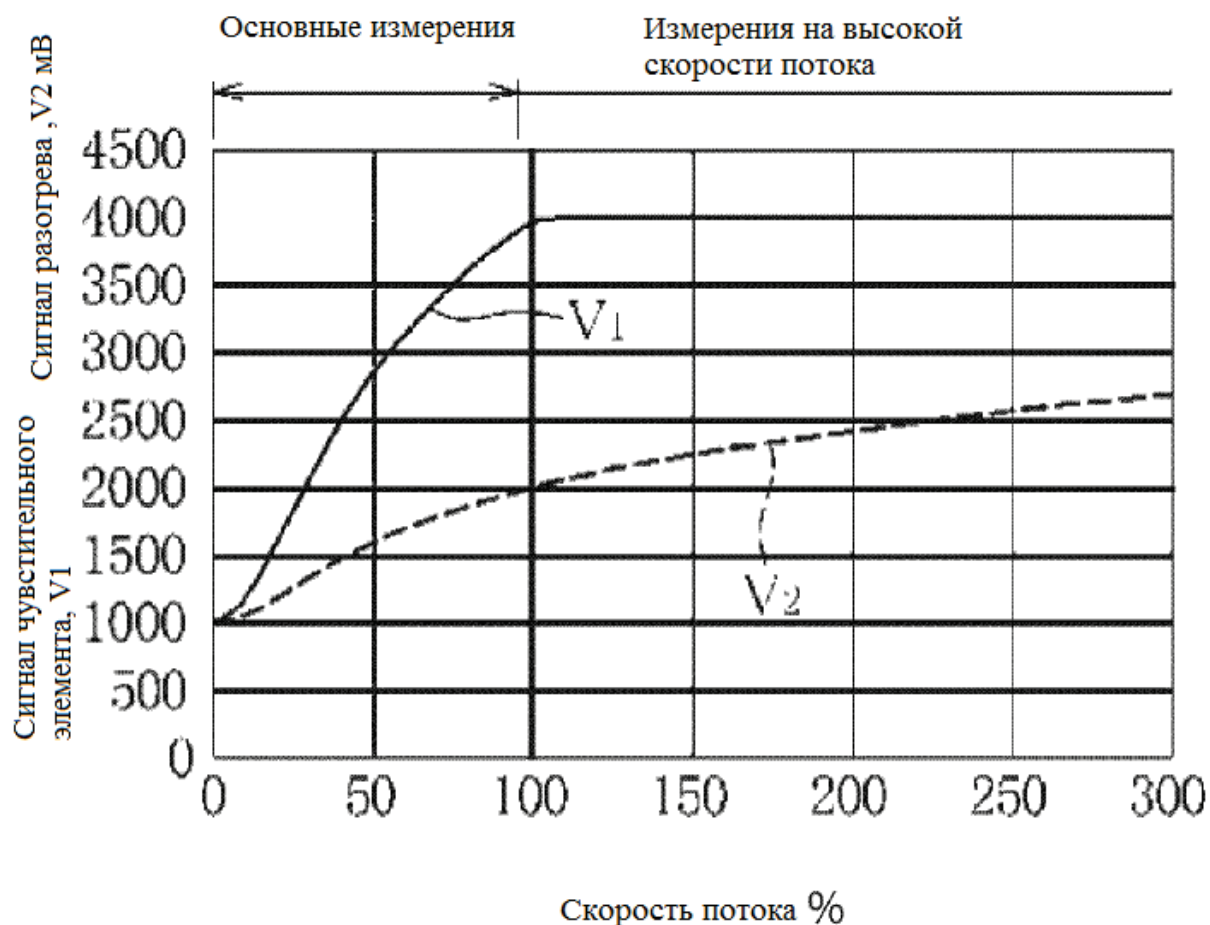


Рис.1.1.2.1.3. Соотношение характеристики разогрева и дифференциального сигнала термочувствительных элементов первичного преобразователя [1]

Патент США №US2009/0164163A1

Данный патент опубликован 25 июня 2009 изобретателями Джао Фен венге, Чай Чан Ченг, Яон Яо и Лиджа Уеном. Первичный преобразователь объемного расхода, описанный в патенте, включает в себя пару тонкопленочных нагревательных элементов, пару термочувствительных элементов и пару опорных терморезисторов, размещенных по обе стороны от нагревателей. Все компоненты, кроме опорных терморезисторов, расположены на тонкой диэлектрической термоизолированной мембране, на подложке из кремния р- или n-типа с ориентацией <100> методом

анизотропного травления. Обе пары нагреватель-термочувствительный элемент представляют собой первичные преобразователи термоанемометрического типа. Опорные терморезисторы необходимые для компенсации влияния температуры внешней среды, поэтому они расположены на полупроводниковой подложке.

Данный первичный преобразователь руководствуется тремя схемами: первая - для работы в первом диапазоне измерений, вторая - во втором, и третья - для проведения точных измерений при низких значениях линейной скорости потока газа. В последнем случае для измерений используется термокалориметричный принцип. [2]

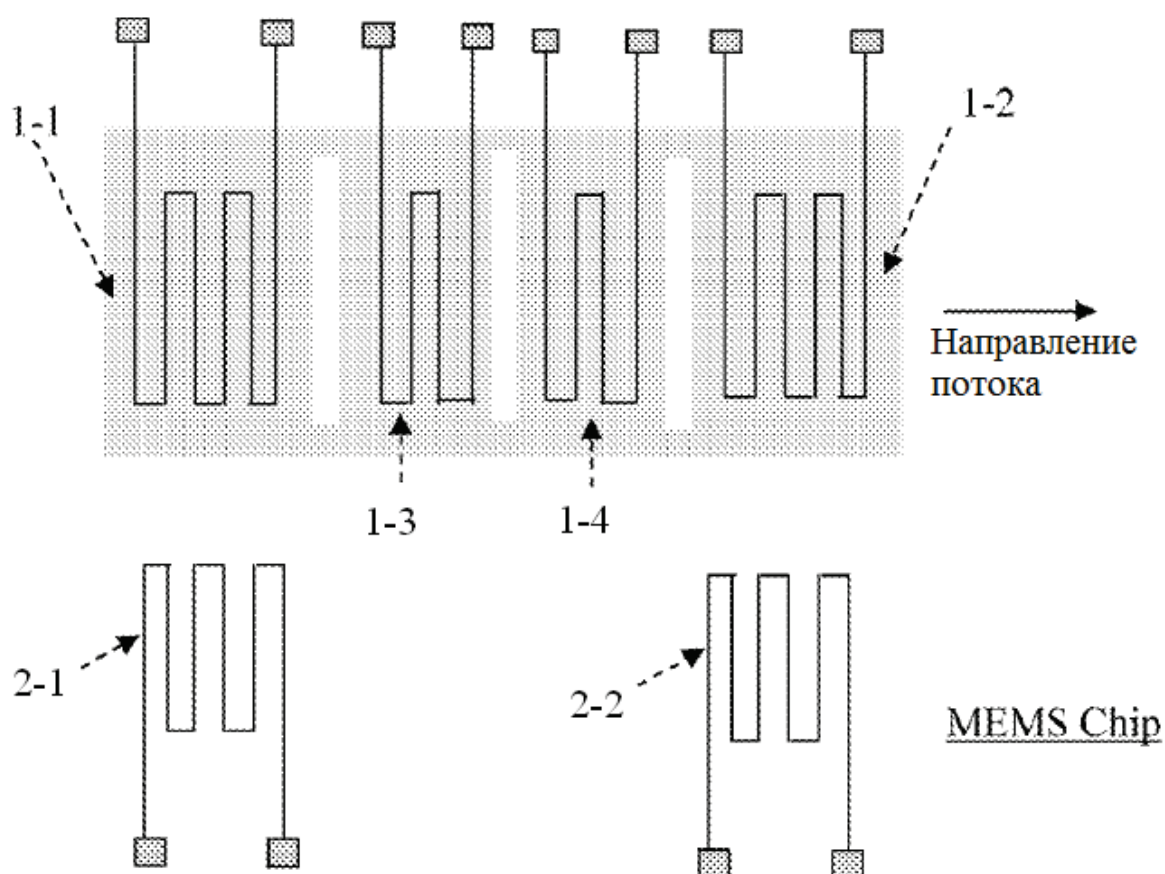


Рис.1.1.2.1.4. Расположение компонентов первичного преобразователя на подложке: 1-1, 1-2 - термочувствительные элементы; 1-3, 1-4 - разогревающие элементы; 2-1, 2-2 - опорные терморезисторы [2]

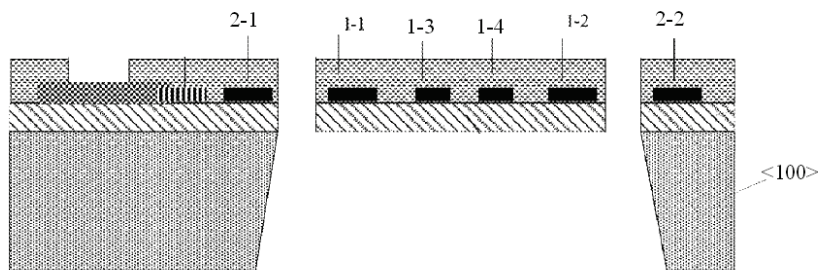


Рис.1.1.2.1.5. Структура первичного преобразователя потерь в сечении [2]

Патент США №US7780342B2

Данный патент опубликован 24 августа 2010 изобретателями Джао Фен венге, Чай Чан Ченг, Яон Яо и Лиджа Уеном. Устройство, описанное в данном патенте, основанный на микромеханических кремниевом первичном преобразователи для измерения концентрации газа или жидкости в бинарной смеси. Данное устройство, кроме концентрации газа или жидкости, способно одновременно и достаточно точно измерять скорость потока газа или жидкости и их массовые расходы. Для измерения концентрации вещества необходимо, чтобы скорость потока была стала или заранее известна и учтена.

Данный первичный преобразователь работает на основе термоанемометричного и термокалориметричного принципов. Чувствительный элемент включает четыре тонкопленочных терморезистора в форме "змейки". Один из терморезисторов является опорным для измерения температуры окружающей среды, один используется в качестве нагревателя. Сопротивление опорного терморезистора в несколько раз выше сопротивления нагревателя и других терморезисторов.

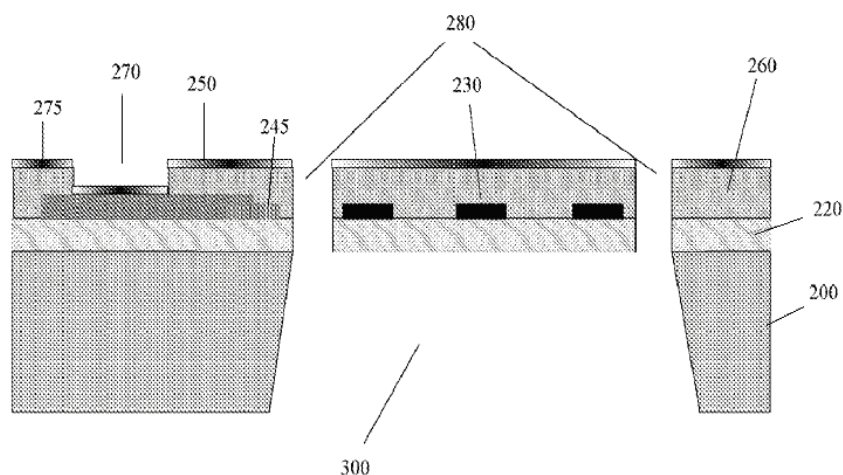


Рис.1.1.2.1.6. Структура первичного преобразователя в сечении:

200 - кремниевая подложка; 220 - слой нитрида кремния (мембрана)
 230 - разогревающие и измерительные терморезисторы; 245 - опорный терморезистор; 260 - слой пассивации; 250, 275 - слой металлизации;
 280 – проточные каналы [3]

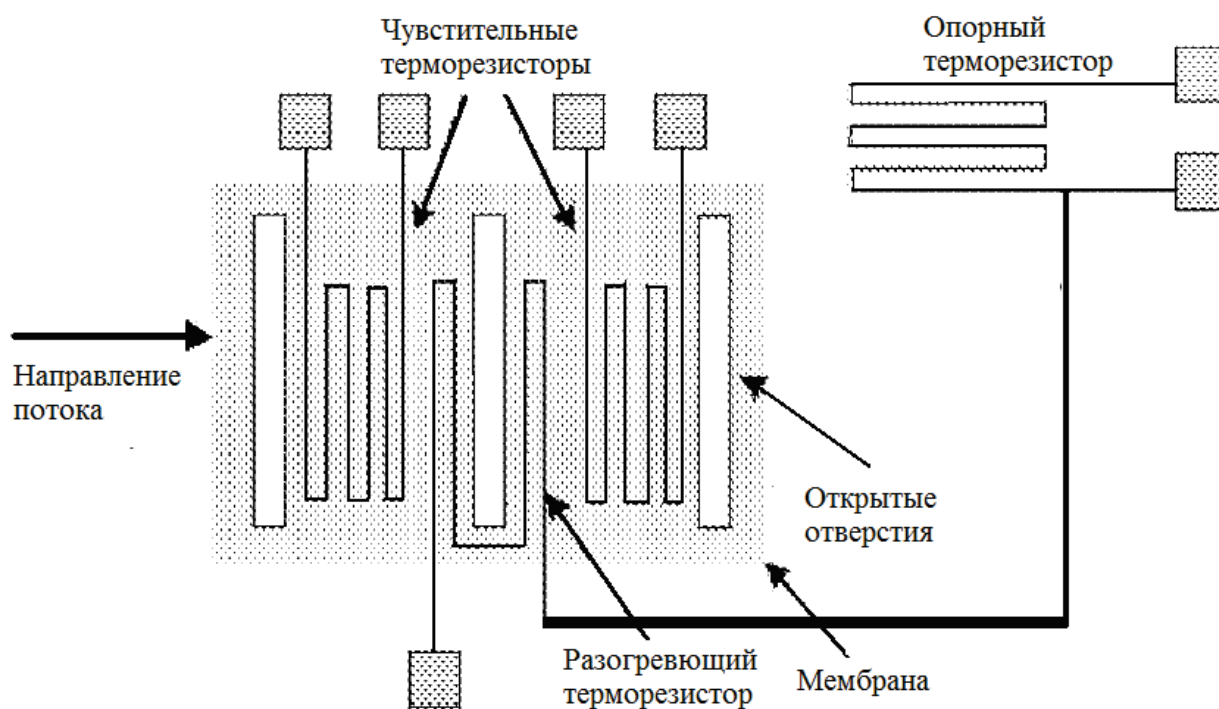


Рис.1.1.2.1.7. Расположение компонентов первичного преобразователя на подложке [3]

Скорость отвода тепла от нагревателя в неподвижной веществе заметно зависит от ее физических свойств, например, плотности жидкости или

концентрации составляющих газа. В зависимости от свойств вещества, пропускаемого через канал, необходима разная мощность подводимая к разогреву, для поддержания постоянной температуры. Таким образом выходной сигнал мощности нагрева может быть откалиброван в качестве показателя плотности жидкости или концентрации составляющих смеси газа. В общем, с изменением этих параметров изменяются тепловые потери нагревательного терморезистора и температура термочувствительных элементов.

1.1.2.2. Преобразователи производства компании Honeywell

В основе работы датчиков расхода газа компании Honeywell лежит опосредованный метод измерений. Кремниевый кристалл включает термоизолированный диэлектрический мостик с расположенными на нем нагревателем и двумя термочувствительными элементами по обе стороны от него. Сначала эти компоненты сформированы осаждением тонких платиновых пленок на тонкой диэлектрической подложке. Путем анизотропного травления кремния формируются два мостика над полостью травления, обеспечивает их термоизоляцию от кремниевой основы и малое время реакции на изменение температуры среды. Принцип действия этого устройства основан на механизме передачи потоком газа теплоты над поверхностью преобразователя и дальнейшей регистрации разницы температур термочувствительными элементами. При отсутствии потока газа, выходное напряжение измерительного моста Уитстона, в который включены терморезисторы, равна нулю. При наличии потока среды на мостиком расположен перед нагревателем термочувствительный элемент охлаждается, а позади нагревателя - нагревается. В результате разбалансировки моста Уитстона появляется выходное напряжение в его измерительной диагонали, пропорциональна скорости потока.

Благодаря малой массе термочувствительных элементов, малым геометрическим размерам и высоким градиентом температуры в

Термоизолированные части преобразователя, такие первичные преобразователи имеют время реакции порядка нескольких миллисекунд, высокую повторяемость результатов и низкий гистерезис [4].

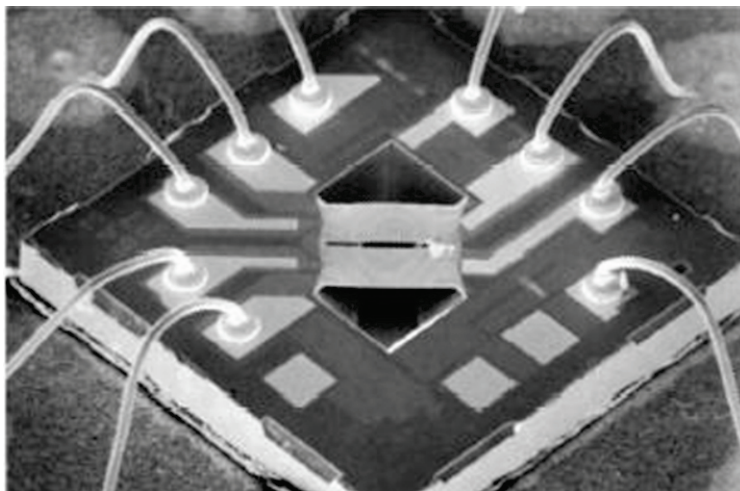


Рис.1.1.2.2.1. Изображение термо изолирующей мембраны с нанесенными компонентами преобразователя [4]

Все преобразователи компании Honeywell можно разделить по степени интеграции на две группы: с милливольтовым выходным сигналом, требующие использования внешних схем разогрева, питания измерительного моста и инструментального усилителя; и с нормализованным выходным сигналом, содержащих все необходимые схемы управления и обработки сигнала. Первичные преобразователи расхода компании Honeywell выпускаются в различных вариантах корпусирования.

1.1.2.2.1 Первичные преобразователи с милливольтовым выходным сигналом

Серия AWM2000

Первичные преобразователи потока газа серии AWM2000 представляют собой пассивные устройства, требующие для работы подключения внешней схемы управления разогревающим элементом, схем питания и усиления выходного сигнала. Они способны измерять скорость потока в обоих направлениях. Данная серия представлена моделями: AWM2100V,

AWM2150V, AWM2200V, AWM2300V, с диапазонами измерений:
 $\pm 200 \text{ см}^3/\text{с}$, $\pm 30 \text{ см}^3/\text{с}$, $\pm 120 \text{ см}^3/\text{с}$, $\pm 1000 \text{ см}^3/\text{с}$ соответственно. [4]

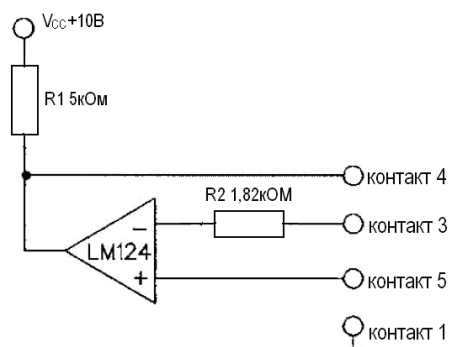


Рис.1.1.2.2.1.2. Предлагаемая
схема контроля разогрева для
AWM2000 [4]

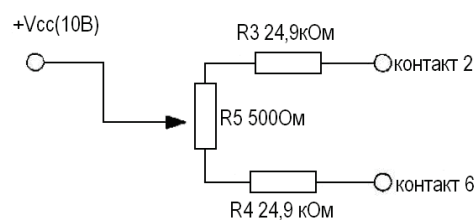


Рис.1.1.2.2.1.3. Предлагаемая
схема цепи питания
чувствительного моста для
AWM2000 [4]

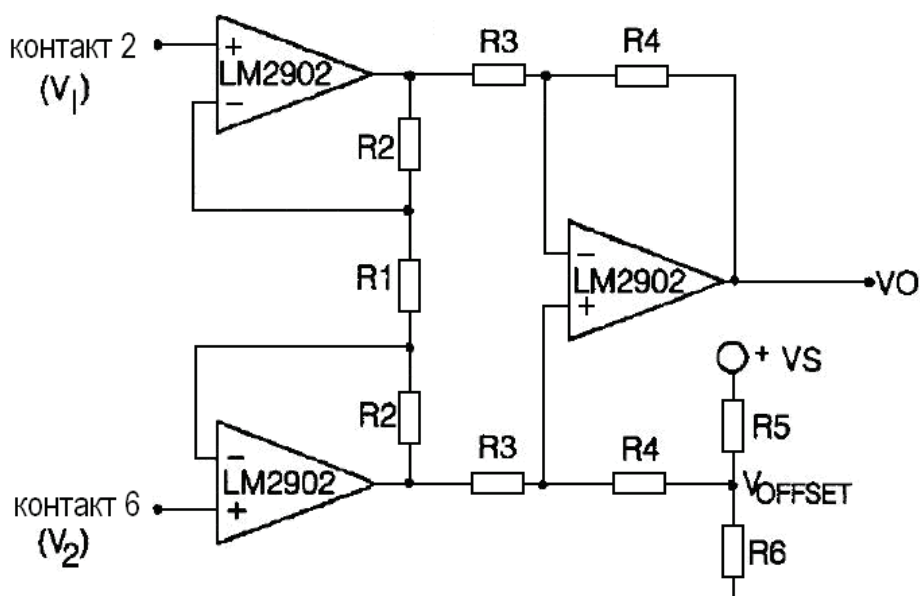


Рис.1.1.2.2.1.4. Схема инструментального дифференциального усилителя
для AWM2000 [4]

Серия AWM3000

В отличие от серии AWM2000, данные преобразователи содержат в себе схему контроля температуры нагревательного элемента и схему дифференциального усилителя выходного сигнала. Преобразователи серий AWM3100V, AWM3150V, AWM3200V, AWM3300V способны измерять скорость потока с максимальными значениями $200 \text{ см}^3/\text{с}$, $30 \text{ см}^3/\text{с}$, $60 \text{ см}^3/\text{с}$, $1000 \text{ см}^3/\text{с}$, или со значениями дифференциального давления 0.49 мБар , 2.5 мБар , 2 мБар , 3.4 мБар соответственно.[5]

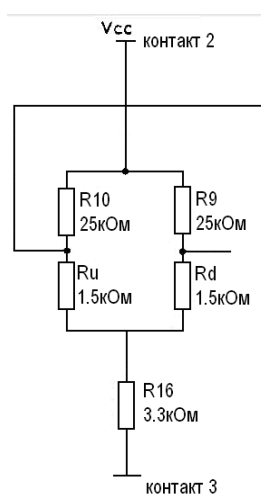


Рис.1.1.2.2.1.5. Встроенная схема контроля разогрева [5]

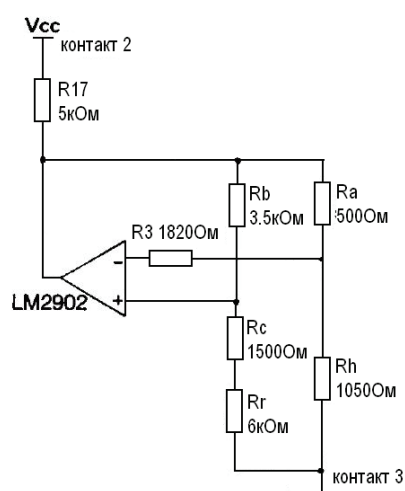


Рис.1.1.2.2.1.6. Встроенная схема питания [5]

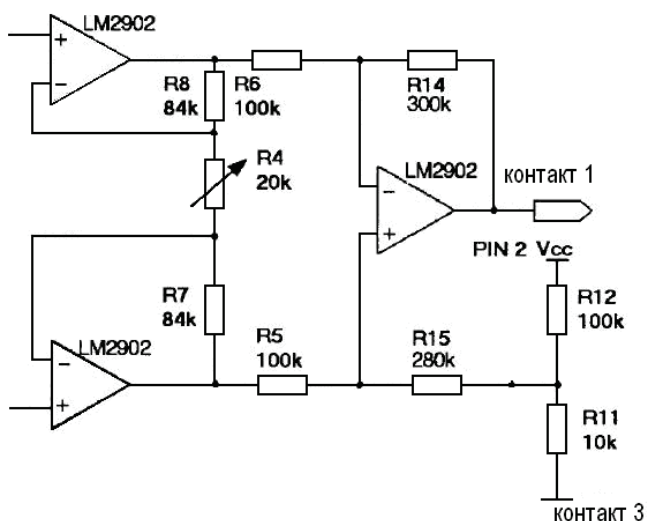


Рис.1.1.2.2.1.7. Схема инструментального дифференциального усилителя в составе AWM3000 [5]

1.1.2.3 Преобразователи производства компании Sensirion

Работа данной группы устройств также основана на термокалориметрическом принципе измерений. Управляемый нагревательный элемент установлен в центре мембраны и датчики температуры установлены симметрично по обе стороны от нагревателя в направлении потока. Стабилизирована давлением мембрана, которая имеет стеклянный слой пассивации, закрытый с фронтальной стороны, вытравленная на кремниевом чипе снизу. Любой поток среды над этой мембраной приводит к переносу тепла от нагревателя и вызывает появление электрического сигнала. Датчик реагирует на перераспределение температуры за время 1,7мс. Плоская поверхность стекла предотвращает оседание загрязнений. Одновременно "воздушная подушка" позволяет использовать преобразователь в условиях сильной вибрации [6].

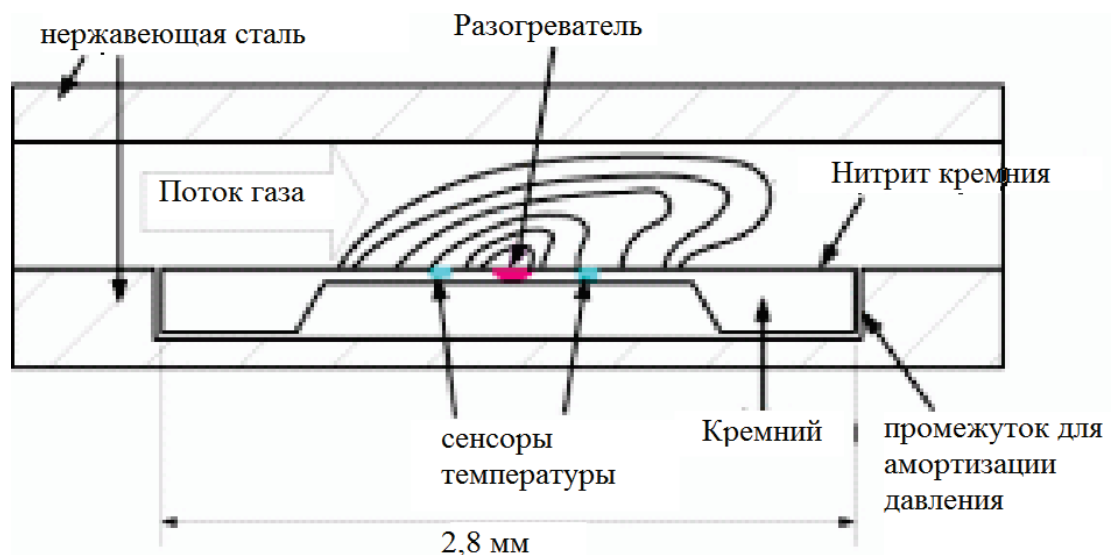


Рис.1.1.2.3.1. Принцип работы температурного измерителя скорости потока газа CMOSens® [6]

Запатентованная КМОП схема интегрированная на одном чипе позволяет осуществлять программируемое, высокоточное усиления и оценку генерируемого аналогового сигнала датчика. Датчик потока газа CMOSens® способен измерять напряжение со значениями всего 500 нВ с долгосрочной стабильностью и без шума. Два интегрированных 16-битных АЦП оцифровывают сигнал датчика потока в виде пакетов длительностью 0,7 мс.

Интегрированный цифровой 20-битный модуль линейаризации, подключенный к выходу, проводит коррекцию нелинейности каждого измеряемого пакета для конкретного датчика и компенсирует возможные температурные воздействия. Далее линейарные пакеты, полученные за определенный запрограммированный период, усредняются. Чип CMOSens® может работать как с цифровым, так и аналоговым выходом, в зависимости от необходимости.

Кроме первичного преобразователя скорости потока, в его состав входит преобразователь температуры, измеряющий разогрев самого чипа и разогрев газа. Эти данные используются для тепловой компенсации показателей.

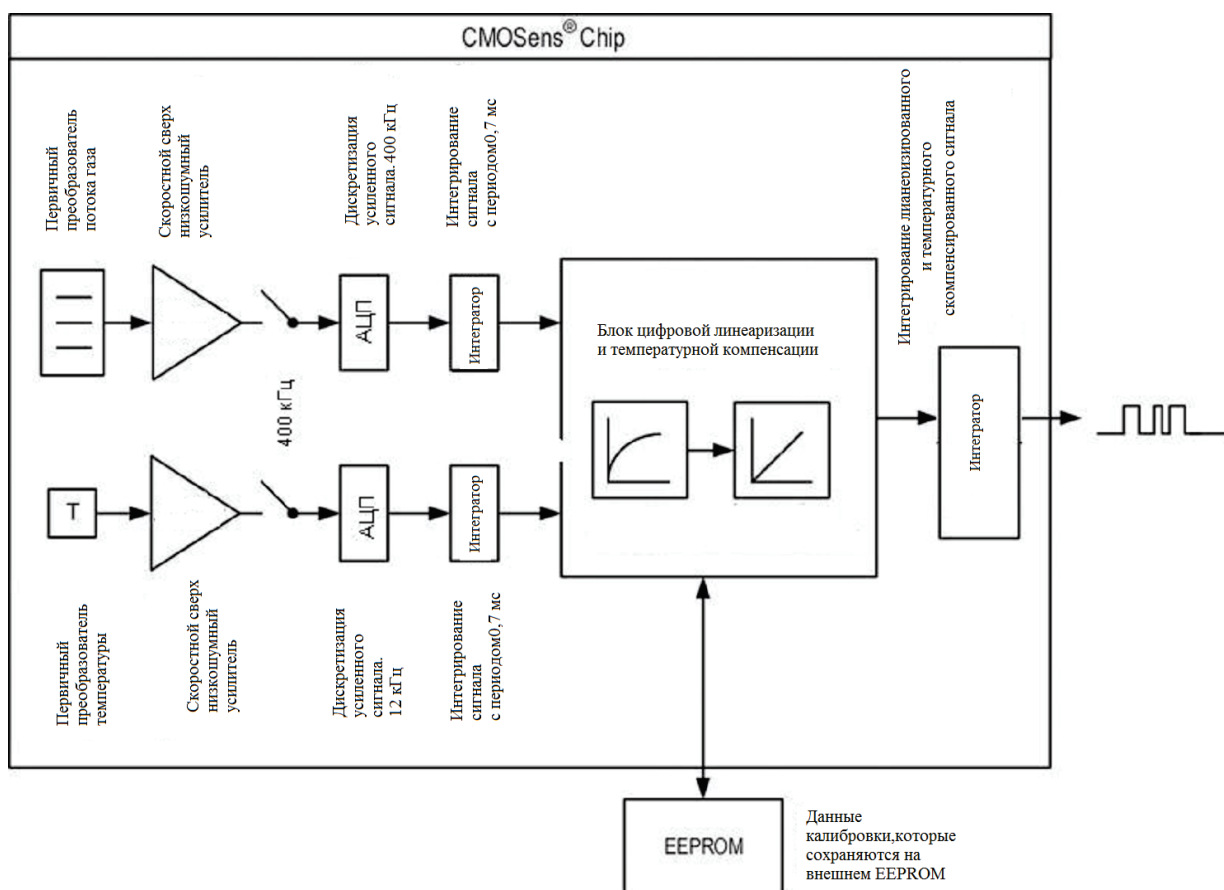
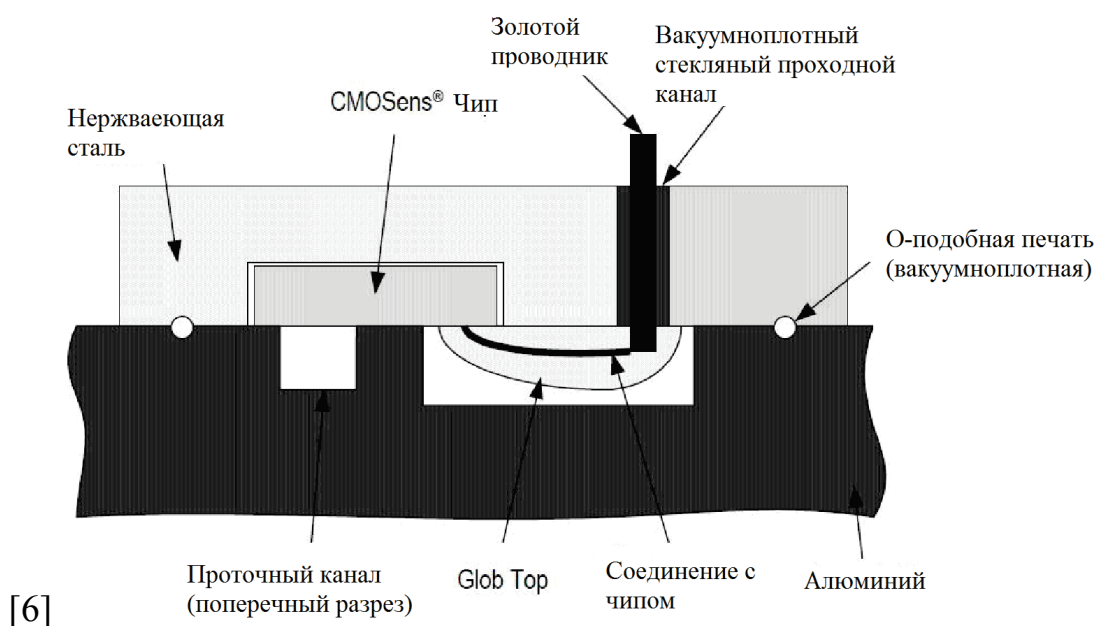


Рис.1.1.2.3.2. Функциональная схема чипа CMOSens® [7]

Чип CMOSens® помещен в вакуумноплотный корпус из нержавеющей стали, который соединен с алюминиевым корпусом через кольцевое вакуумное соединение. Такая конструкция корпуса позволяет SFC4000 работать при высоких значениях входного давления.



[6]

Рис.1.1.2.3.3. Структура первичного преобразователя на основе чипа CMOSens® [7]

Датчики серий SFC3000 і SFC4000, кроме высокочувствительных элементов, содержат в себе высокофункциональный модуль интерфейса. Разработанная измерительная система обеспечивает 10-кратное повышение скорости измерения (150 мс) и значительно более высокую точность, благодаря интеграции тепловых датчиков потока на кремниевом чипе CMOSens®, что является значительным достижением в развитии технологии измерения расхода. [7]

Серія SFC3000

Данная серия устройств включает в себя измерители и контроллеры потока, а также контроллеры давления, с интерфейсом RS485. В одном КМОП-чипе объединены высокоточный чувствительный элемент и системы оцифровки, линеаризации и коррекции измеряемого сигнала. Тип исследуемого газа задается программно, даже при выполнении измерений. Рабочими газами являются N_2 , He , H_2 , Ar , и некоторые другие сухие газы, которые не способствуют коррозии. Измерительный диапазон для данных устройств составляет $0-200 \text{ см}^3/\text{с}$.. Диапазон рабочих температур: $15-55^\circ\text{C}$. Для температур, не входящих в диапазон $20-30^\circ\text{C}$, необходимо учитывать температурный коэффициент коррекции. Относительная погрешность измерений составляет $\pm 2\%$ от измеренного значения, при скорости потока больше, $10 \text{ см}^3/\text{с}$, и $\pm 0.2 \text{ см}^3/\text{с}$ - при скоростях меньших $10 \text{ см}^3/\text{с}$. [7]

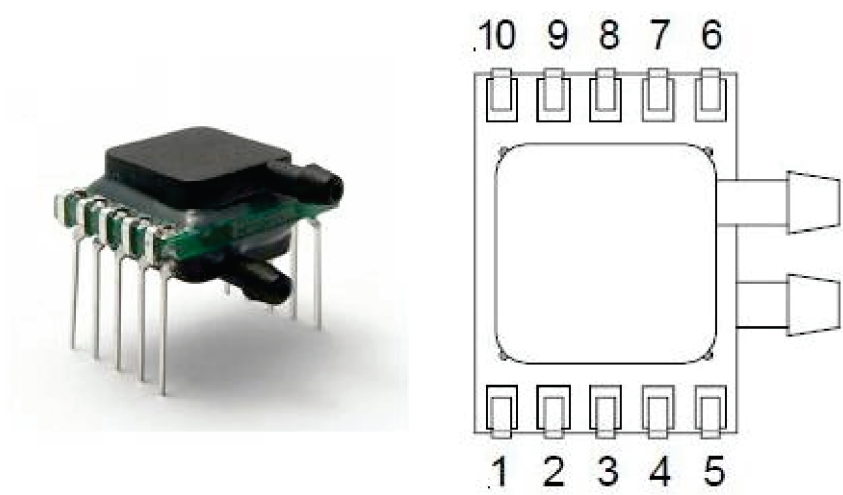
Серія SFC4000

Дана серія представлена моделями SFC4100 і SFC4200. Перша має максимальну пропускну здатність $0.05 \text{ л}/\text{хв}$ або $0.5 \text{ л}/\text{хв}$, друга – $1,2,5 \text{ л}/\text{хв}$ або

$20 \frac{\mu}{\text{хв}}$. Пристрої характеризуються порівняно високою точністю і швидкодією.[7]

1.1.2.4 Первичные преобразователи производства компании SensorTechnics

Серія LBA



Контактная ножка	Соединение
1	Земля
2	+V _s
3	Земля(основная)
4	V _{out} (Двусторонние устройства)
5	V _{out} (одност устройства)
6, 7, 8, 9, 10	Земля

Все выводы на землю 1,3,6,7,8,9,10
должны быть соединены

Рис.1.1.2.4.1. Внешний вид и маркировка контактов первичных преобразователей серии LBA.[9]

Первичные преобразователи серии LBA измеряют сверхнизкие значения разницы давления воздуха или газа на их входных пневматических портах (от 25 Па). Конструкция устройств основана на технологии MEMS. Данная технология позволяет интегрировать микрометрический канал для потока, в кремниевый чип. Газовый поток передает тепло от

расположенного выше нагревателя к расположенному ниже терморезистору. Разница температур между ними вызывает появление выходного сигнала, пропорционального массовому потоку. Поскольку поток вызван перепадом давления между двумя портами датчика, выходной сигнал также является мерой перепада давления.

Датчик LBA основан на кремниевом чипе, который содержит микрометрический канал, чувствительный элемент и полностью аналоговую КМОП схему формирования сигнала. Благодаря интеграции миниатюрного канала непосредственно в чип, данные устройства характеризуются рекордно высоким пневматическим сопротивлением (до 200.000 Па / (мл / с)), что на порядок превышает аналогичные показатели аналогичных ТРП. Это уменьшает расход газа на преобразователи и позволяет его использование в пыльных и влажных средах, а также при использовании в длинных пневматических соединениях.

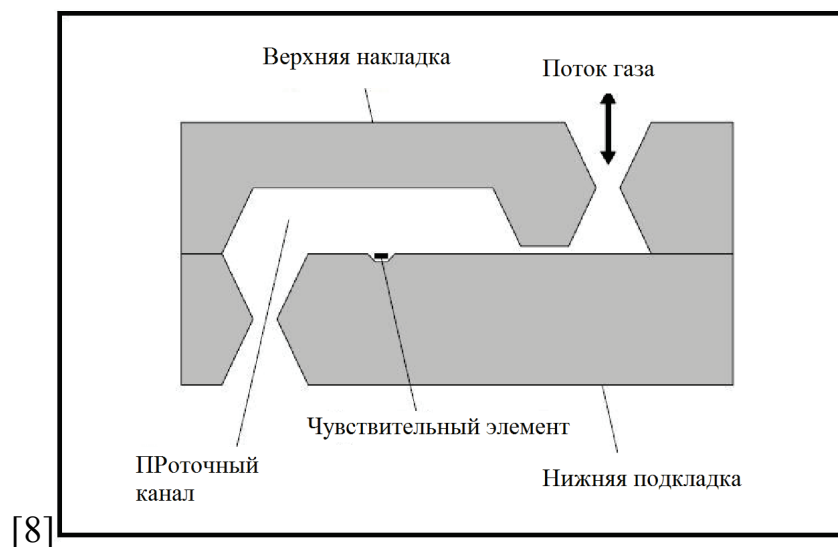


Рис.1.1.2.4.2. Структура проточного канала первичных преобразователей серии LBA.[8]

1.1.2.5. Терморезисторные первичные преобразователи лаборатории медицинской сенсорики ФЭЛ НТУУ “КПИ”.

Терморезисторные первичные преобразователи лаборатории медицинской сенсорики ФЭЛ НТУУ "КПИ" и основные примеры их практического применения описаны в [10-11]. Основой МЭМС - преобразователя служит пластина монокристаллического кремния ориентации $\langle 100 \rangle$ с нанесенным тонким слоем диэлектрика $\text{SiO}_2 / \text{Si}_3\text{N}_4$. С передней стороны на диэлектрической подложке методами фотолитографии и травления сформированы пленочные никелевые резисторы, количество и топология которых определены типом преобразователя и способом измерения. С обратной стороны пластины методами двусторонней фотолитографии формируются окна в диэлектрике, в результате сквозного травления кремния через которые формируются диэлектрические мембраны под резисторами, закрепленные по периметру на кремниевой подложке. "Вырожденная" планарная геометрия (отношение линейных размеров мембраны к ее толщине 1000: 1) и свойства материала мембраны обеспечивают одновременно надежный тепловой контакт размещенных на ней резисторов с окружающей средой и значительное термоизоляцию от подложки.

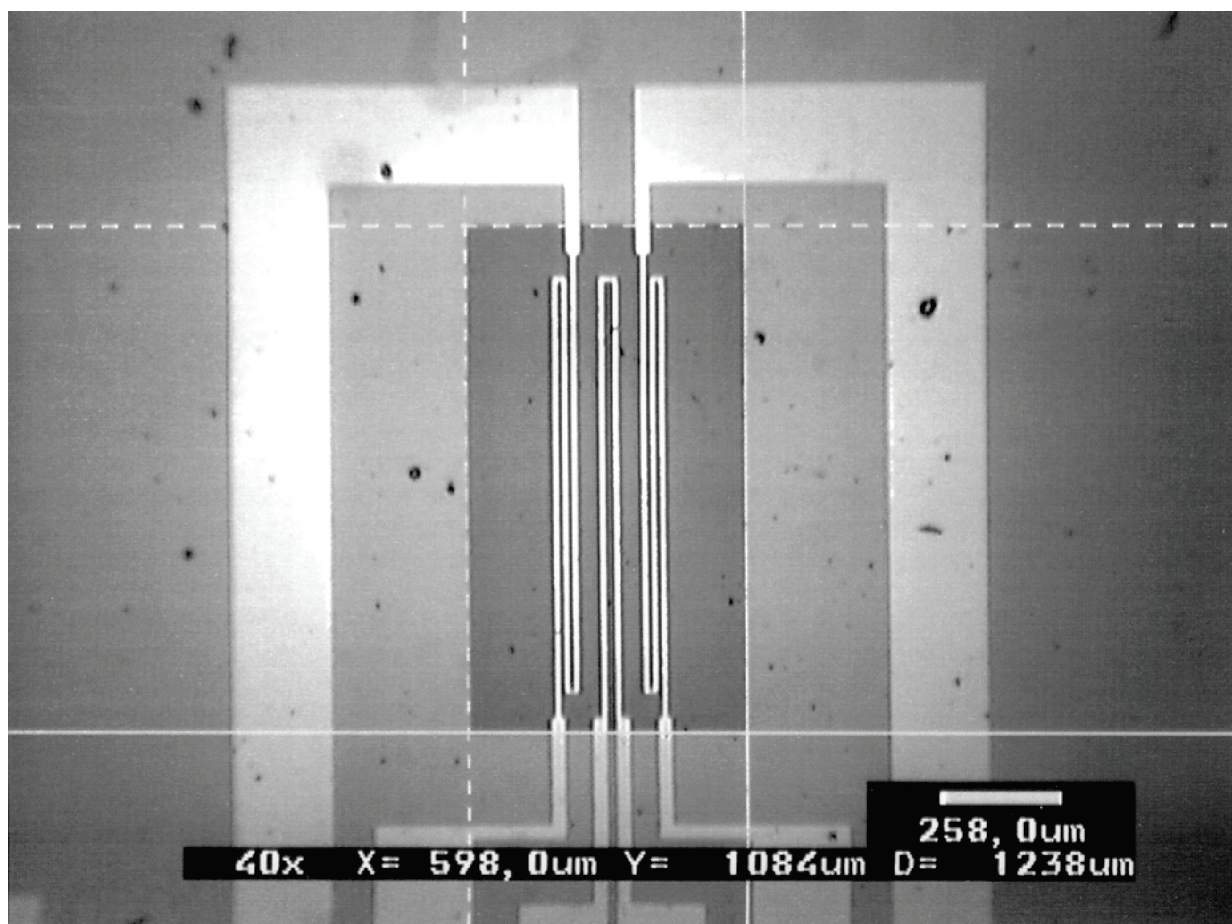


Рис.1.1.2.5.1. Терморезисторный первичный преобразователь лаборатории медицинской сенсорики ФЭЛ НТУУ “КПІ” [10].

1.2. Обзор структуры, интерфейса и функциональности платформы виртуальных лабораторных приборов NI ELVIS II.

1.2.1. Внешний вид и общая информация про прибор

Лабораторная платформа виртуальных приборов NI ELVIS II включает в себя 12 наиболее используемых лабораторных измерительных инструментов: осциллоскоп, цифровой мультиметр, функциональный генератор, анализатор спектра и другое.

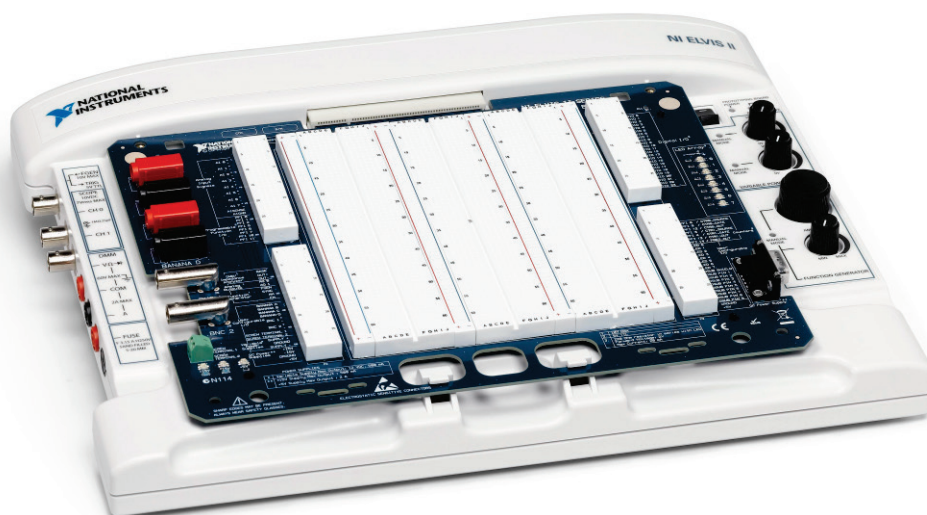


Рис.1.2.1.1. Платформа виртуальных лабораторных приборов NI ELVIS II [15].

Основана на среде графического программирования NI LabVIEW, платформа NI ELVIS обеспечивает гибкость виртуальных измерительных инструментов и возможность быстрого перенастройки измерительной программы. Настольная измерительная станция и устройство для сбора информации образуют полную лабораторную измерительную систему. Панель управления рабочей станции обеспечивает возможность управления функциональным генератором и сменными источниками питания с помощью ручек управления, и содержит разъемы для коаксиальных кабелей

на выходе функционального генератора и на входах каналов осциллографа. Также имеются разъемы для кабелей типа «банан», используемых в цифровой мультиметр.

Маршрутизацией и преобразованием сигналов руководит традиционное программное обеспечение NI ELVIS. Один и тот же сигнал генератора можно направить как на стандартный вход осциллографа, так и на один из входов платы сбора информации.

Рабочая настольная станция также содержит защиту макетной платы, которая защищает устройства сбора данных от возможных повреждений в результате лабораторных ошибок. Макетная плата подключается к настольной рабочей станции и предоставляет пространство для построения электронных схем.

Все 12 инструментов платформы NI ELVIS доступны через панель NI ELVISmx Launcher. Эти инструменты реализованы в среде графического программирования LabVIEW, что обеспечивает их гибкость и возможность настройки, благодаря открытому программному коду виртуального инструмента

Сбор данных - это процесс измерения электрического или физического явления, такого как напряжение, ток, температура, давление или звук с компьютера. Система сбора данных состоит из первичных преобразователей, устройства для сбора информации (DAQ) и компьютера с программным обеспечением. По сравнению с традиционными измерительными системами, система ПК-DAQ способна использовать вычислительную мощность компьютера, дисплей большого размера, а также есть возможность подключения стандартных промышленных компьютеров обеспечивает более мощное, гибкое и экономически эффективное решение для измерений.

Устройство сбора данных (DAQ) выступает в качестве интерфейса между компьютером и внешними сигналами. В первую очередь он функционирует как устройство, оцифровывает входные аналоговые

сигналы. Он включает в себя: схему преобразования сигнала, аналого-цифровой преобразователь и шину для передачи данных. Многие устройства сбора информации включают в себя другие функции для автоматизации измерительных систем и процессов. Например, цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) выходных сигналов, аналоговые и цифровые линии ввода / вывода, счетчики / таймеры для подсчета и генерации цифровых импульсов.[12]

1.2.1 Основные компоненты платы сбора данных.

Преобразование сигнала

Сигналы от первичных преобразователей могут быть зашумленным или слишком малой величины для непосредственной обработки. Схема формирования сигнала преобразует его в форму, пригодную для ввода в АЦП. Это может быть усиление, ослабление, фильтрация или изоляция. Некоторые DAQ устройства включают в себя встроенные схемы преобразования сигнала, предназначенные для определенных типов первичных преобразователей.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

Аналоговые сигналы от датчиков должны быть оцифрованы перед передачей их для обработки компьютером. На практике аналоговые сигналы непрерывно изменяются во времени. АЦП оцифровывает текущие значения сигнала в определенные моменты времени с заданной периодичностью. Результаты оцифровки передаются в компьютер с помощью шины, где выходной сигнал восстанавливается программным обеспечением. Разрядность АЦП в составе NI ELVIS II составляет 16 бит, что позволяет проводить измерения сравнительно высокой точности.

Шина передачи данных

DAQ устройства подключаются к компьютеру через слот или порт. Шина компьютера служит в качестве интерфейса передачи данных между устройством и компьютером, а также для передачи инструкций DAQ-устройства. Эти устройства осуществляют связь с компьютером с помощью самых распространенных типов шин: USB, PCI, PCI Express, и Ethernet. Совсем недавно, устройства сбора данных, стали доступны для беспроводной связи через 802.11 Wi-Fi.

Для работы с традиционным программным обеспечением NI ELVIS рекомендуется использовать DAQ-устройства серии M USB или PCI типов:

- NI 6221 • NI 6229 • NI 6255 • NI 6281
- NI 6225 • NI 6251 • NI 6259 • NI 6289

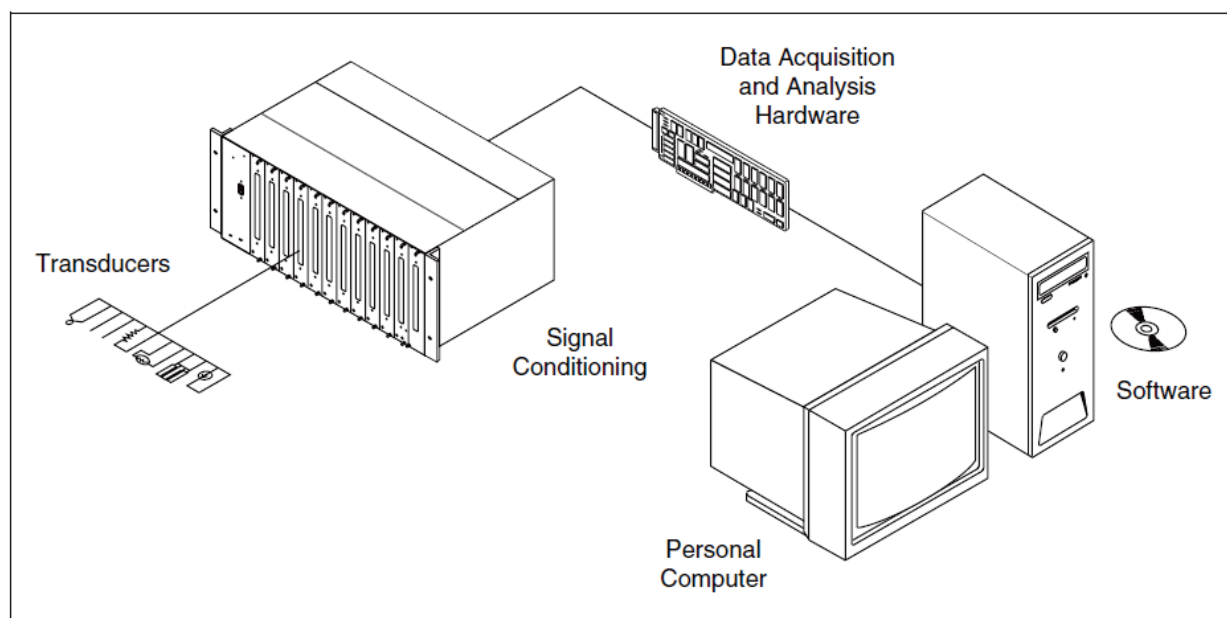


Рис.1.2.2.1. Структура системы сбора данных.[12]

1.2.2. Обзор основных функциональных блоков платформы NI ELVIS II и их разъёмов

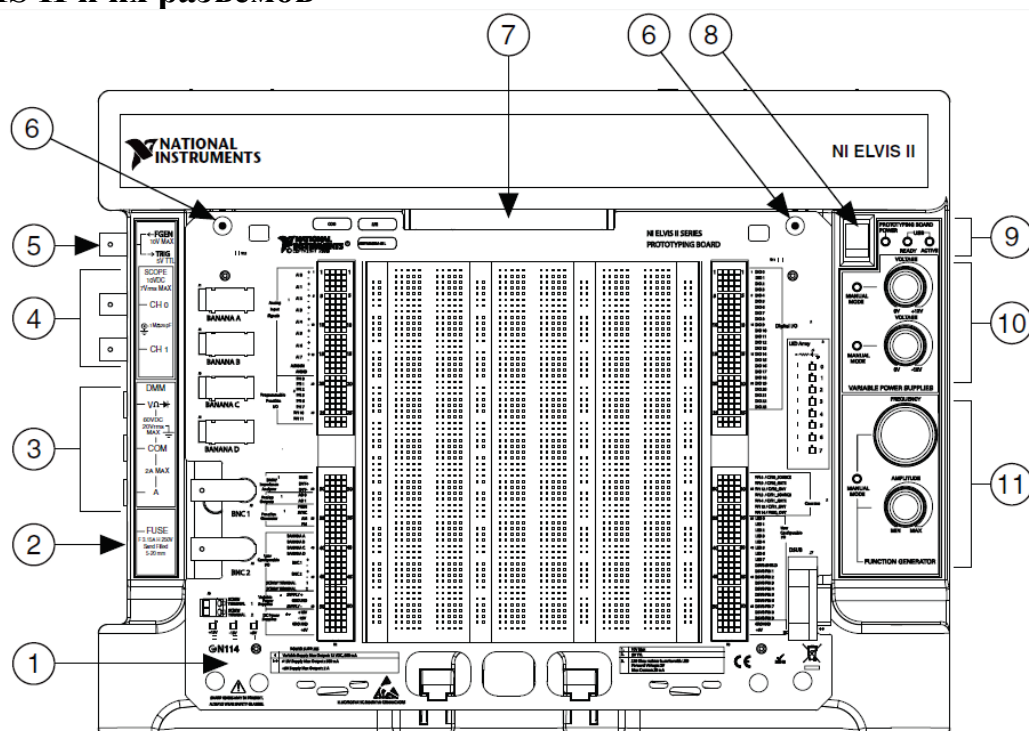


Рис.1.2.3.1. Платформа виртуальных инструментов NI ELVIS II(вид сверху).[13]

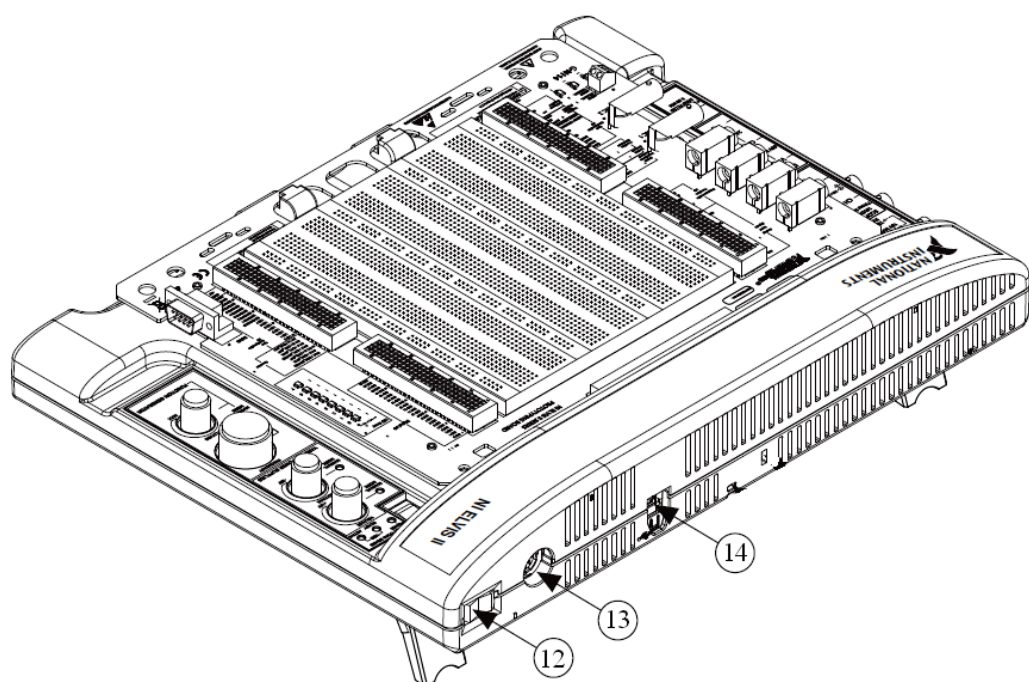


Рис.1.2.3.2. Платформа виртуальных инструментов NI ELVIS II(вид сзади).[13]

Таблица 1.2.3.1. назначение основных блоков интерфейса
измерительной станции.[13]

1 - макетная плата ELVIS II	8 - переключатель питания макетной платы
2 - предохранитель цифрового мультиметра	9 - индикаторные светодиоды
3 - разъемы цифрового мультиметра	10 - панель ручного управления переменным источником питания
4 - разъемы осциллоскопа	11 - панель ручного управления функциональным генератором
5 - разъем выхода функционального генератора / входа цифрового триггера	12 - переключатель питания
6 - крепление для монтажа макетной платы	13 - разъем для подключения к сети
7 - соединение макетной платы с рабочей станцией	14 - USB-разъем

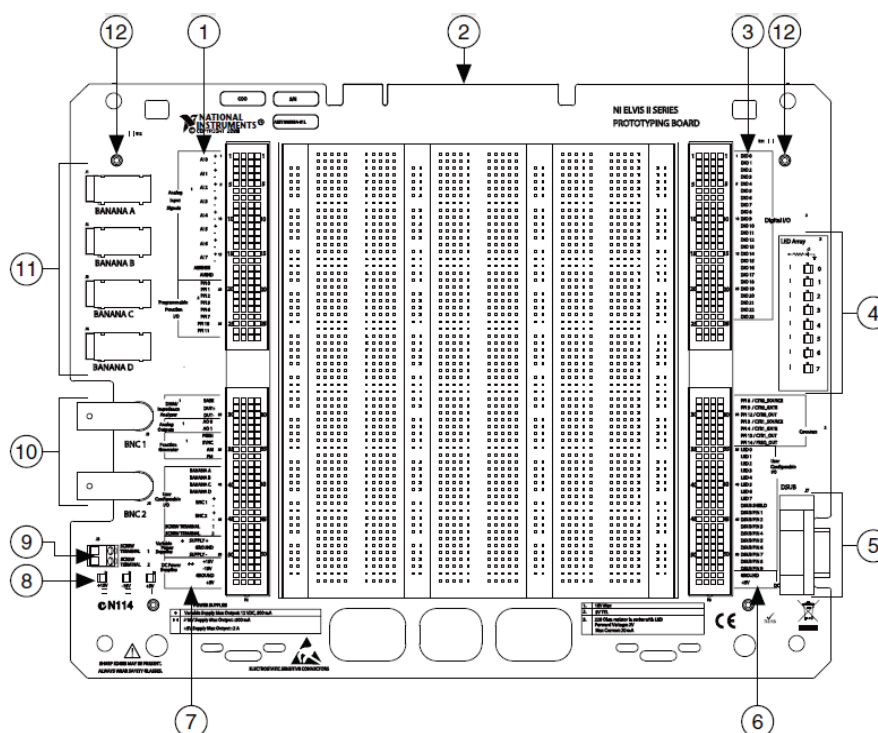


Рис.1.2.3.3. Макетная плата серии ELVIS.[13]

Таблица 1.2.3.2. Назначение функциональных блоков макетной платы.[13]

1 - блок аналоговых входов и входов программируемых функциональных интерфейсов	7 - блок разъемов цифрового мультиметра, функционального генератора, аналоговых выходов, программируемых входов / выходов, переменного и постоянных источников питания
2 - соединение с рабочей станцией	8 - индикаторы работы источников постоянного напряжения
3 - блок цифровых входов / выходов	
4 - блок программируемых светодиодов	10 - программируемые коаксиальные разъемы
5 - D-SUB разъем	11 - блок программируемых разъемов типа «банан»
6 - блок сигнальных разъемов счетчика / таймера, блок программируемых входов / выходов, разъемы выходов постоянных источников питания	

Таблица 1.2.3.3. Условные обозначения сигналов и их разъемов.[13]

Наименование сигнала	Описание сигнала
AI<0..7> \pm	Разъемы для аналоговых входов от 0 до 7 – позитивный и негативный входы для дифференциального включения.
AI SENSE	Опорный сигнал для аналоговых входов в режиме NRSE
AI GND	Точка заземления для аналоговых входов
PFI<0..2>,<5..7>,<10..11>	Програмир. интерфэйсные функции. Разъемы для статичных цифровых входов.выходов или сигналов синхронизации.
BASE	Точка подключения базы для трёхконтактного измерения ВАХ транзистора

Продолжение таблицы 1.2.3.3.

DUT+	Клема возбуждения. 2/3-контактный измеритель ВАХ, цифровой мультиметр, анализатор импеданса
DUT-	Точка виртуального заземления. 2/3-контактный измеритель ВАХ, цифровой мультиметр, анализатор импеданса
AO<0..1>	Разъёмы аналоговых выходов(используются, как выходы генератора произвольных функций)
FGEN	Выход функционального генератора
SYNC	Сигнал синхронизованный с выходом функционального генератора
AM	Вход амплитудной модуляции функционального генератора
FM	Вход фазовой модуляции функционального генератора
BANANA<A..D>	Разъемы типа «банан», программируются пользователем
BNC<1..2>±	Разъемы для коаксиальных соединений
SCREW TERMINAL<1..2>	Входы/выходы, программируются пользователем
SUPPLY+	Переменный источник положительной постоянного напряжения
GROUND	Точка заземления
SUPPLY-	Переменный источник отрицательной постоянного напряжения
+15 V	Источник постоянного напряжения
-15 V	Источник постоянного напряжения
GROUND	Точка заземления
+5 V	Источник постоянного напряжения
DIO<0..23>	Блок цифровых входов/выходов

PFI8/CTR0_SOURCE	Програм-ные интерфейсные функции
------------------	----------------------------------

Продолжение таблицы 1.2.3.3.

PFI9/CTR0_GATE	Програм-ные интерфейсные функции
PFI12/CTR0_OUT	Програм-ные интерфейсные функции
PFI13/CTR1_SOURCE	Програм-ные интерфейсные функции
PFI4/CTR1_GATE	Програм-ные интерфейсные функции
PFI13/CTR1_OUT	Програм-ные интерфейсные функции
PFI14/FREQ_OUT	Програм-ные интерфейсные функции
LED<0..7>	Блок свето диодов
DSUB SHIELD	Вход/выход D-SUB соединения
DSUB PIN<1..9>	Блок разъёмов для доступа к отдельным контактам D-SUB соединения

1.2.4. Конфигурация аналоговых входов

При настройке входных каналов и подключении сигнала, необходимо определить, есть источник сигнала плавающим или с опорной землей.

1.2.4.1. Заземленные источники сигнала

Источник сигнала с опорной землей подключается к системе заземления здания, то есть оно уже подключено к общей точке заземления по отношению к DAQ-устройства, с учетом того, что компьютер тоже должен быть подключен к той же сети. Разница в потенциалах земли между двумя приборами, подключенными к одной электросети составляет, как правило, от 1 до 100 мВ, эта разница может влиять на результаты измерений. В данном случае необходимо подключать дифференциальный аналоговый вход непосредственно к источнику сигнала, без подключения его к заземлению. [12]

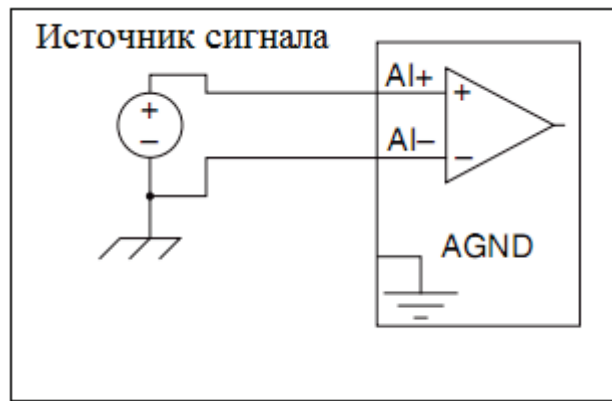


Рис.1.2.4.1.1. измерение сигнала с заземленного источника [12].

1.2.4.2 Плавающие (не заземленные) источники сигнала.

Плавающее источник сигнала подключен к той же опорной земли, DAQ-устройство. Оно имеет свою изолированную опорную точку. К плавающим источникам сигнала относятся: устройства батарейного питания, выходы трансформаторов, термопары, выходы оптических изоляторов и изолирующие усилители. Прибор или устройство, имеет изолированный выход является плавающим источником сигнала. Необходимо подключить опорную землю для плавающего источника сигнала к контакту AGND через резистор смещения или перемычку для создания опорной точки для сигнала. В противном случае, измеряемый входной сигнал изменится на величину миграции источника сигнала в диапазоне синфазного шума. Самый простой способ для создания опорной точки для источника к AGND это соединить положительный контакт к входу AI + и подключить отрицательный контакт к AGND а также к входу AI- без резисторов. Это соединение хорошо работает с источниками постоянного тока с низким входным сопротивлением (менее 100 Ом).

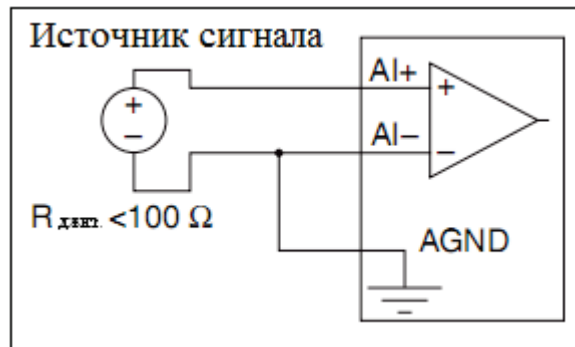


Рис.1.2.4.2.1. Дифференциальное подключение источника сигналов без резисторов [12].

Однако для источников с большим сопротивлением, это подключение оставляет возможность потери баланса дифференциального сигнала. Шум, который подсоединяется электростатически к положительной линии, не присоединяется к негативной, так как она связана с землей. Этот шум появляется как дифференциальный сигнал вместо синфазного сигнала, и таким образом добавляется к данным измерений. В этом случае вместо прямого подключения отрицательной линии к AGND, необходимо подключить ее к AGND через резистор который примерно в 100 раз больше выходного сопротивления источника. Шум в обеих линиях будет практически уравновешенным.

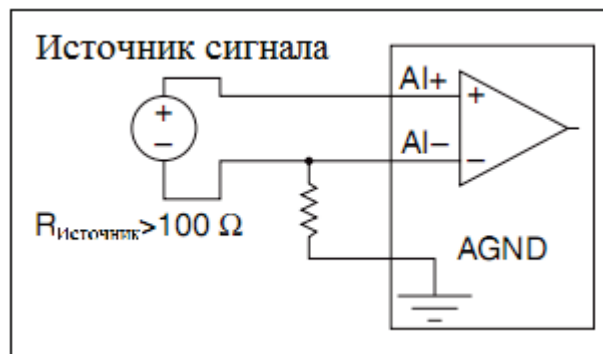


Рис.1.2.4.2.2. Дифференциальное подключение сигнала с плавающей землей с одним резистором [12].

Для того, чтобы полностью сбалансировать сигнальный тракт, надо подключить еще один резистор того же номинала между положительным

входом и AGND, как показано на рисунке. Это обеспечивает лучшую компенсацию шумов, но имеет недостаток: нехватка нагрузки источника к земле. Например, если источник с импедансом 2кОм, а каждый из двух резисторов на 100кОм, то резисторы нагружают источник на 200К и приводят к -1% погрешности усиления.

1.2.5. Програмное обеспечение для DAQ-приборов

1.2.5.1. LabVIEW

LabVIEW представляет собой среду графического программирования, используемый для создания виртуальных инструментов для тестирования, измерений и автоматизации. LabVIEW использует иконки вместо текстовых строк для создания приложений. В отличие от текстовых языков программирования, LabVIEW использует потоки данных, где каждый поток определяет работу отдельного виртуального инструмента [12].

1.2.5.2. SignalExpress

SignalExpress является интерактивным, автономным инструментом для проведения измерений. SignalExpress может использоваться для:

- интерактивного измерения, генерации, анализа, сравнения, импорта и сохранения сигналов.
- одновременного сравнения расчетных данных с данными измерений

Инструменты SignalExpress могут быть импортированы в виртуальный инструмент LabVIEW, созданный пользователем, для дальнейшего расширения или совершенствования.

Сочетание аппаратных средств платформы NI ELVIS и устройства сбора информации (DAQ) обеспечивает работу таких лабораторных инструментов:

- Функциональный генератор
- Осциллоскоп
- Сменная источник напряжения
- Измеритель фазочастотных и амплитудно-частотных характеристик
- Анализатор импеданса
- Цифровая шина считывания
- Цифровая схема записи
- Двухпроводной измеритель тока / напряжения
- трехпроводных измеритель тока / напряжения
- Анализатор спектра сигнала. [12]

1.3. Вывод по литературному обзору

Ознакомившись с ситуацией вокруг развития сенсорных систем на основе терморезистивных преобразователей, можно сделать вывод, что на данный момент эта отрасль развита достаточно неоднородно, и отсутствует четкая документация относительно принципов измерения. Больше всего работ на данный момент посвящено терморезистивных первичным преобразователям массовых и объемных расходов и сенсорным системам на их основе. Зарегистрировано большое количество патентов, касающихся данной темы.

Значительно меньше развиты системы для исследования других параметров газовой среды. Например концентрации, или процессов, связанных с теплоемкостью или теплопроводностью. Итак актуальной является проблема разработки соответствующих методов измерения и устройств на их основе.

2. Методы традиционного стационарного и динамического измерения сред.

Использование терморезисторных первичных преобразователей (ТРПП) физических величин в указанных режимах позволяет повысить информативность измерительного сигнала, расширить сферу их использования, снизить погрешность измерения. В результате при разработке ТРПП возникает необходимость определения их динамических параметров, к которым традиционно относятся динамический коэффициент рассеивания мощности G_{thD} , тепловая τ_{th} и электрическая τ_e постоянные времени, теплоёмкость чувствительного элемента C_{th} , динамический множитель D , динамическое электрическое сопротивление R_{Td} . Типичные численные значения постоянной времени современных пассивных ТРПП, изготовленных по технологии микроэлектромеханических систем на кремнии (МЭМС) с размещением чувствительных элементов на тонкой диэлектрической мембране или мостике, составляют единицы миллисекунд в воздухе при нормальных условиях. Теплоёмкость первичного преобразователя при этом составляет величину порядка $(10^{-6} - 10^{-8})$ Дж/°С. Это позволяет расширить частотный диапазон чувствительности ТРПП до нескольких килогерц и реализовать скорость изменения температуры отдельных элементов первичного преобразователя свыше 10^5 °С/с на нагревании и охлаждении. Приведенные выше численные значения параметров тепловых преобразователей в МЭМС исполнении указывают на проблематичность применения традиционных методик.[20]

2.1. Метод для определения стационарного и нестационарного распределения температуры

Анализ роли тепловых процессов в теплофизических микросенсорах позволил выделить следующие критерии для их классификации:

- 1) параметры тепловых процессов являются измеряемыми величинами;
- 2) тепловые процессы являются промежуточными при преобразовании измеряемой величины в выходной сигнал микросенсора;
- 3) параметры тепловых процессов (тепловые потоки) управляются измеряемой величиной;
- 4) тепловые процессы активируют или регулируют процесс преобразования в сенсоре.

Используя данные критерии, все теплофизические микросенсоры разделены на следующие группы:

- 1) теплофизические микросенсоры прямого преобразования;
- 2) теплофизические микросенсоры с промежуточным тепловым преобразованием;
- 3) теплофизические микросенсоры с управляемыми тепловыми потоками;
- 4) теплофизические микросенсоры с температурной активацией и управлением;
- 5) комбинированные теплофизические микросенсоры. [19]

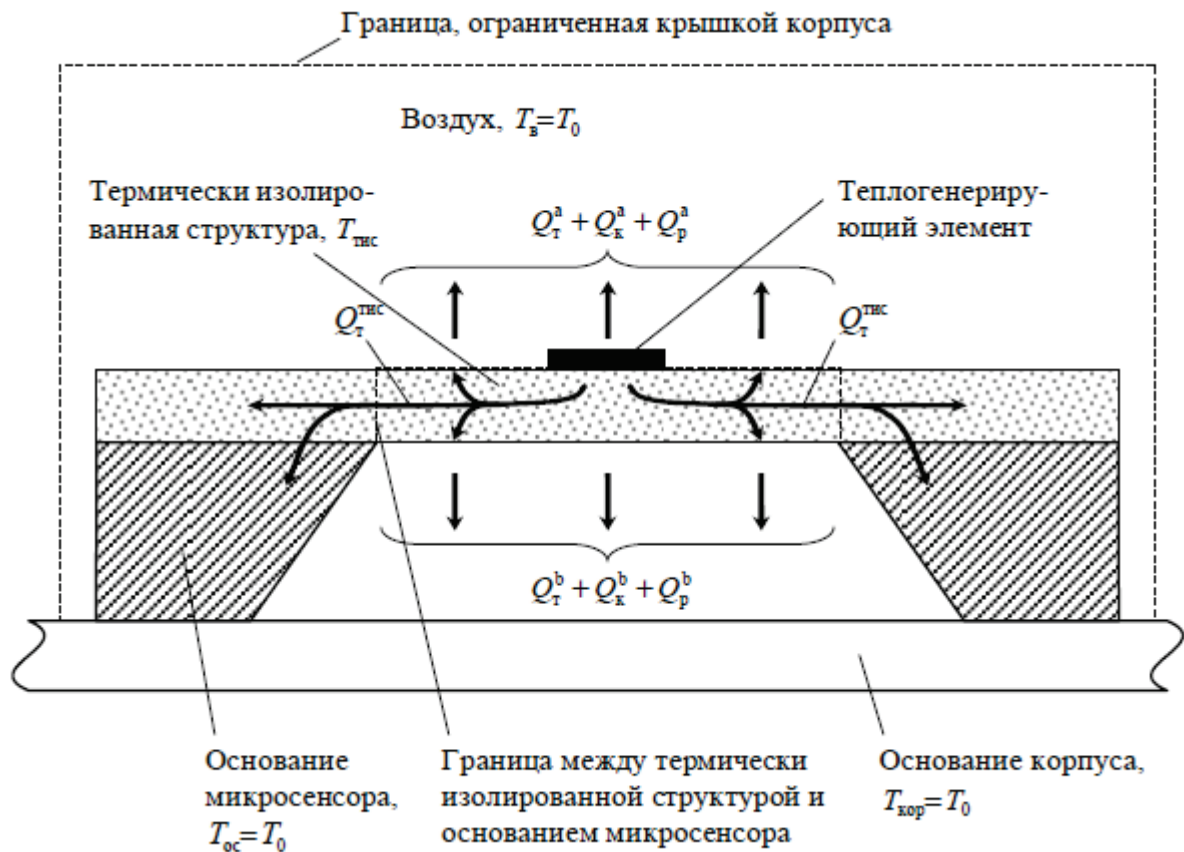


Рис. 2.1.1 Распределение тепловых потоков и значение температур элементов в типичной конструкции теплового микросенсора: $Q_{\text{т}}$, $Q_{\text{к}}$, $Q_{\text{р}}$ - тепловые потоки, обусловленные, соответственно, теплопроводностью, конвективным и радиационным теплообменом; верхние индексы "а", "б", "тис" относятся, соответственно, к тепловым потокам от термически изолированной структуры (вверх и вниз) и через нее; T_0 , $T_{\text{в}}$, $T_{\text{тис}}$, $T_{\text{ос}}$, $T_{\text{кор}}$ - соответственно, температуры окружающей среды, воздуха, термически изолированной структуры, основания микросенсора и основания корпуса. [19]

Аналитический метод для определения стационарного и нестационарного распределения температуры в двумерных термически изолированных структурах теплофизических микросенсоров. Этот метод использует следующий алгоритм (на примере теплового микросенсора с прямоугольными границами и со стационарным тепловым воздействием).

Двумерная термически изолированная структура теплового микросенсора разделяется на прямоугольные зоны в зависимости от состава слоев и условий тепловыделения. Каждая зона, состоящая из нескольких слоев, заменяется эквивалентной зоной с однородными параметрами (эквивалентной толщиной $d_e^{(j)}$ и эквивалентной теплопроводностью $\lambda_e^{(j)}$:

$$d_e^{(j)} = \sum_{i=1}^n k_i^{(j)} d_i^{(j)}; \quad (2.1.1)$$

[19]

$$\lambda_e^{(j)} = \left[\sum_{i=1}^n k_i^{(j)} d_i^{(j)} \lambda_i^{(j)} \right] / d_e^{(j)} \quad (2.1.2)$$

[19]

где $k_i^{(j)}$ – коэффициент, равный отношению общей площади слоя i в зоне j к площади зоны; $d_i^{(j)}$ – толщина слоя i в зоне j ; $\lambda_i^{(j)}$ – удельная теплопроводность материала слоя i в зоне j .

Для каждой зоны определяются условия теплообмена с окружающей средой. Данный теплообмен осуществляется: а) посредством теплопередачи через газовую среду и радиационного теплообмена через нижнюю и верхнюю поверхности зоны; б) посредством теплопроводности через края зоны с соседними зонами и подложкой

Для каждой зоны определяется стационарное уравнение теплопроводности, которое решается методом разделения переменных. Учитывая, что условия теплообмена в зонах (за исключением теплообмена по краям зон) имеют одинаковый вид, стационарные уравнения теплопроводности для зон будут иметь также одинаковый вид.

Определяются значения весовых коэффициентов, для нахождения которых используются уравнения равенства температур на границах между зонами. Чтобы получить полную систему для всех весовых коэффициентов

необходимо, во-первых, записать условия равенства температур для каждой границы между зонами и перейти к конечным значениям индексов суммирования, во-вторых, получить системы линейных уравнений для каждой границы между зонами и, в-третьих, объединить системы линейных уравнений для всех границ в одну обобщенную систему линейных уравнений.[19]

2.2. Динамический метод измерения теплофизических характеристик среды

Динамический метод измерения теплофизических характеристик среды, основан на регистрации изменения временных параметров искусственно создаваемой периодической тепловой волны, распространяющейся в среде между источником и приемником тепла. Метод теплофизических измерений основан на использовании периодической тепловой волны, позволивший создать сенсорную теплофизическую интегральную микросистему повышенной стабильности и чувствительности. В основу метода положено измерение временных параметров искусственно стимулированной тепловой волны, распространяющейся в среде между источником и приемником тепла, то есть между исполнительным и чувствительным элементами.[18] Для физико-математического обоснования данного метода используется решение задачи распространения тепла в полубесконечном теле от источника с температурой поверхности периодически изменяющейся по закону:

$$T_c = T_{\max} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{\tau_0}\right) \quad (3.2,1)$$

[18]

где: T_c – температура поверхности, T_{\max} – амплитуда температурных колебаний, τ - время, τ_0 - период колебаний

решения, определяющие изменение температуры вдоль координаты x по нормали к поверхности:

$$T = T_{\max} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\pi}{a \cdot \tau_0}} \cdot x} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot \tau_0}} \cdot x\right), \quad (3.2.2)$$

[18]

где x – координата по нормали к поверхности.

Для любого расстояния x колебания температуры имеют один и тот же период, однако на расстоянии x от источника колебания запаздывают по фазе:

$$\Delta \tau = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{a \cdot \pi}} \cdot x \quad (3.2.3)$$

[18]

где $\Delta \tau$ - время запаздывания.

Таким образом, в предложенном методе тепловое поле меняется во времени периодически, что является основой для универсального чувствительного элемента анемометрического датчика с повышенной чувствительностью, поскольку в основу метода положено измерение временных параметров.[18]

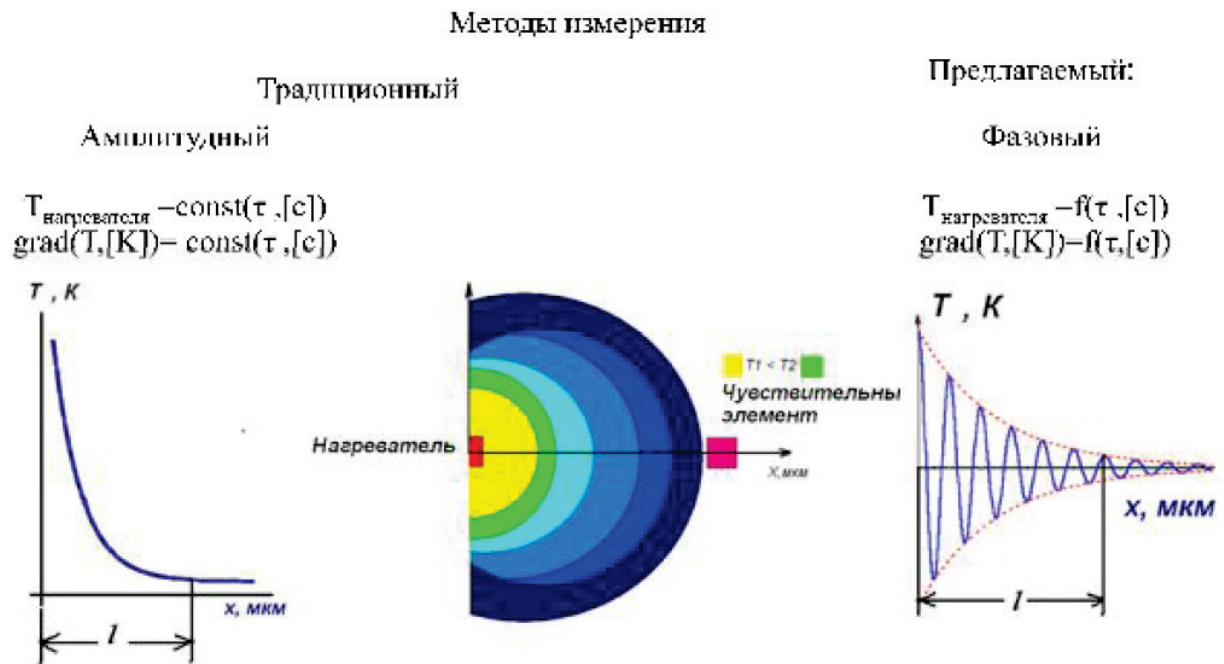


Рис. 3.2.1 Сравнение традиционного и предлагаемого метода теплофизических измерений. [18]

3. Экспериментальная часть

3.1. Разработка функциональной схемы измерительного прибора

Измерительный стенд состоит из платформы виртуальных приборов NI ELVIS II, схемы усиления тока питания на основе операционного усилителя, набранной на макетной плате, герметичной газовой камеры, терморезисторной первичного преобразователя, компьютера и виртуального измерительного инструмента, созданного в среде LabVIEW 8.6.

В качестве используемых функциональных блоков платформы NI ELVIS II выступают:

- функциональный генератор в составе NI ELVIS II;

- цифровой осциллограф в составе NI ELVIS II;
- виртуальный измерительный инструмент, созданный в среде LabVIEW 8.6;
- Электронная схема повторителя напряжения с усилением тока.

3.1.1. Функциональный генератор

Этот виртуальный инструмент предназначен для генерации сигналов стандартного типа (синусоида, прямоугольный импульс или треугольный импульс), с максимальной амплитудой 10 В от пика до пика. Разрешение по амплитуде составляет 10 бит. Диапазон частот выходного сигнала: для синусоиды - 0,186 Гц..5 МГц., Для треугольных и прямоугольных импульсов - 0,186 Гц..1 МГц. Разрешение по частоте - 0,186Гц. Есть возможность частотной развертки, амплитудной и частотной модуляции сигнала. Выходное сопротивление составляет 50 Ом. Максимальный выходной ток - 100 мА. Выходной сигнал функционального генератора можно направить на макетную плату или на коаксиальный разъем. [14]

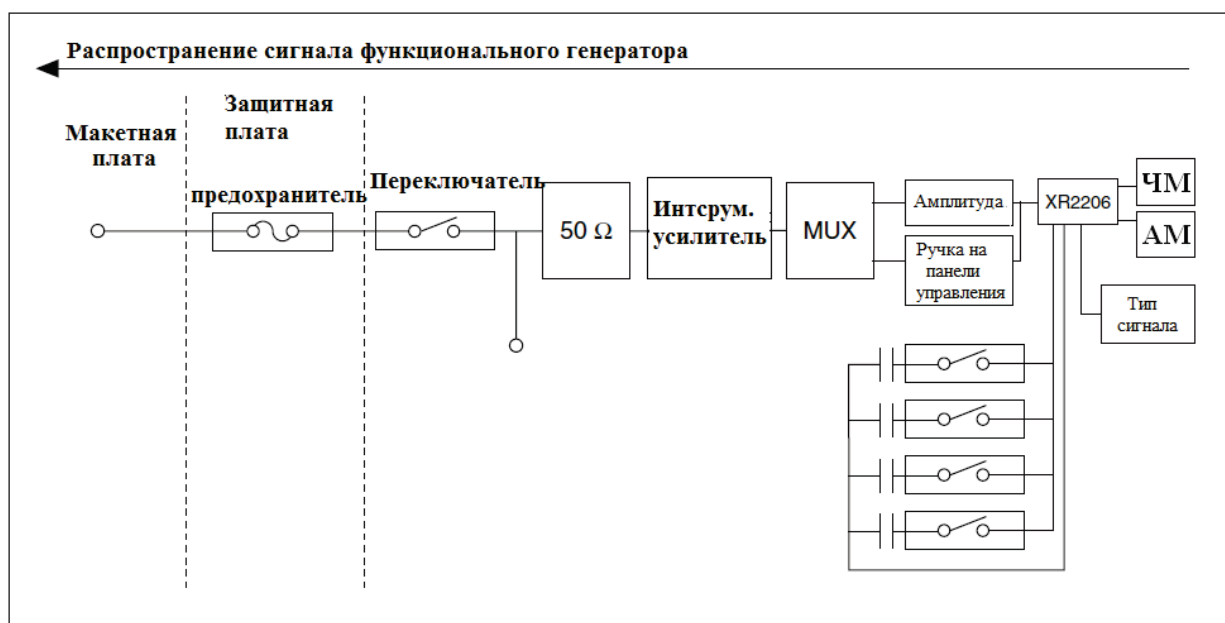


Рис.2.1.1.1. Блок-схема функционального генератора в составе ELVIS II.[14]

NI

3.1.1. Осциллограф

Этот виртуальный прибор обеспечивает функциональность стандартного настольного осциллографа. Осциллограф в составе NI ELVIS II имеет два канала.

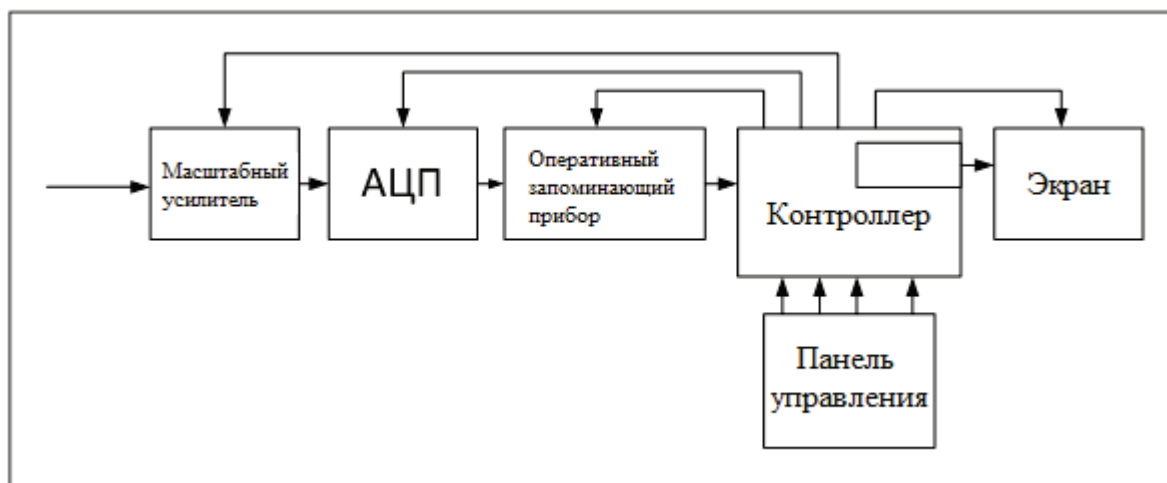


Рис.2.1.2.1. Блок-схема осциллографа в составе NI ELVIS II

Основные функциональные параметры инструмента (для серии NI ELVIS II):

разрешение АЦП	16 бит.
рабочая частотная полоса	1,7 МГц
входное сопротивление	1 МОм
максимальная скорость измерений:	
один канал	$1.25 \cdot 10^6$ изм/с
два канала	$500 \cdot 10^3$ изм/с

Фронтальная программная панель обеспечивает масштабирование и регулировки положения, и управление разверткой. Существует возможность подключения внешнего сигнала в качестве триггера. Функция Автомасштабирование позволяет регулировать шкалу измерений на основе размаху сигнала. Можно выбрать цифровое или аналоговое источник сигнала триггера. Существует возможность использования курсоров на

экране виртуального инструмента для точного определения значений сигнала. [14]

3.1.3. Электронная схема повторителя напряжения с усилением тока

Данная схема собрана из дискретных компонентов на макетной плате платформы NI ELVIS II. Ее использование необходимо для обеспечения питания низкоомного терморезисторной элемента током достаточной величины, а также для компенсации влияния на результаты измерений выходного сопротивления функционального генератора в составе NI ELVIS

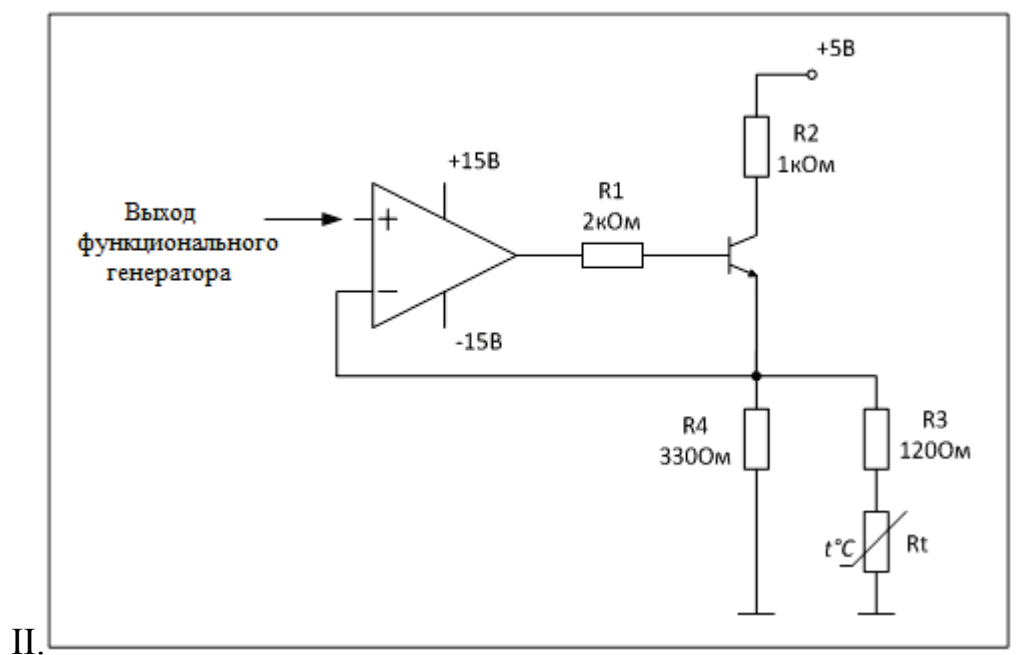
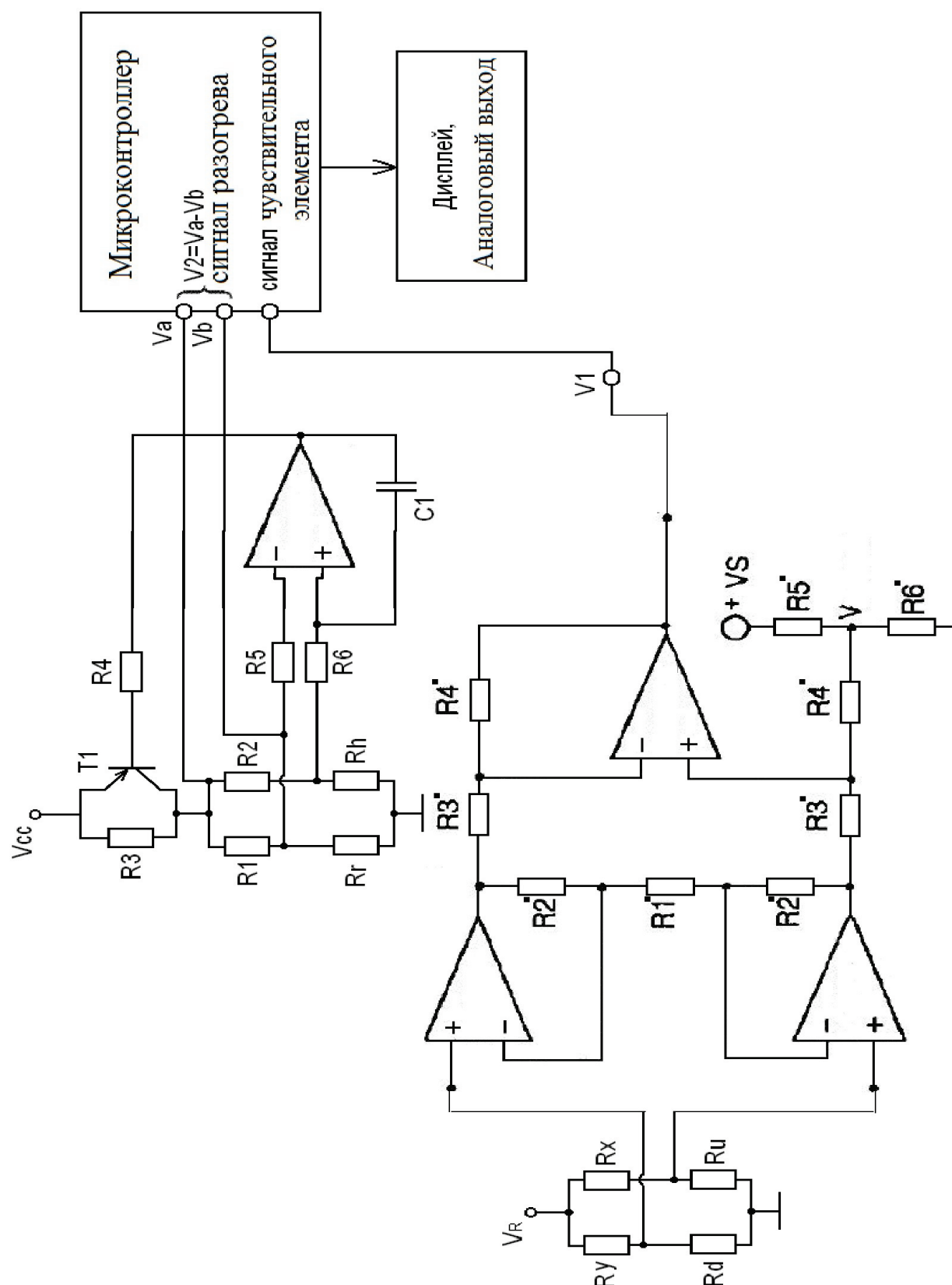


Рис.2.1.3.1. Схема повторителя напряжения с усилением тока

3.1.4. Структурная схема измерения теплофизических параметров среды с использованием ТРП



Данная схема разработана в перспективе создания измерительного прибора

3.4.Рекомендации к дальнейшему совершенствованию разработки

В дальнейшем целесообразно разработать виртуальный измерительный инструмент для проведения экспериментов.

3.5 Вывод по экспериментальной части

В ходе выполнения экспериментальной части была разработана структурная схема измерительного прибора, получены навыки работы с функциональной платформой виртуальных лабораторных приборов NI ELVIS II в виртуальной среде LabVIEW. После анализа результатов было предложено направление дальнейшей работы.

4. Разработка стартап проекта

4.1. Описание идеи проекта

Таблица 4.1. Описание идеи стартап-проекта

Содержание идеи	Направления применения	Выгода для пользователя
Использование сенсоров при создании измерительных устройств: датчиков массового расхода, датчиков температуры, Времяпролетных датчиков.	1. Авиационная промышленность	Измерение температуры газов в двигателях , температуры в камерах сгорания, наружного воздуха и др.
	2. Газовая промышленность	Измерение Скорости потока,объема прошедшего газа.

	3. микроэлектроника, генная инженерия, системы жизнеобеспечения в локальных объемах, химические технологии, фармакология, биотехнология	Развитие дозаторов газообразных веществ
--	---	---

Таблица 4.2. Определение сильных, слабых и нейтральных характеристик идеи проекта

№ п / п	Технико-экономические характеристики идеи	(Потенциальные) товары / концепции конкурентов				W (слабая сторона)	N (нейтральная)	S (сильная сторона)
		Мой проект	Конкурент 1	Конкурент2	Конкурент3			
1.	экономическое	1000 у.е.	1200 у.е.	1100 у.е.	900 у.е.		-	
2.	назначение	Сенсор теплофизических параметров в газовой среде	Сенсор теплофизических параметров в газовой среде	Сенсор теплофизических параметров в газовой среде	Сенсор теплофизических параметров в газовой среде			+
3.	надежности	Долговечность - 5 лет	Долговечность – 6 лет	Долговечность - 5 лет	Долговечность - 4 года			+
4.	технологические	Многофункциональность	Многофункциональность	Многофункциональность	Многофункциональность		+	
	эргономичные	-	-	-	-		+	

5.								
6.	органолептические	-	-	-	-		+	
7.	эстетические	-	-	-	-		+	
8.	Транспортабельности	высокая	высокая	высокая	высокая		+	
9.	экологичности	Экологичный	Экологичный	Экологичный	Экологичный		+	
10.	безопасности	безопасно	безопасно	безопасно	безопасно		+	

Конкурент 1: SensorTechnics

Конкурент 2: Honeywell

Конкурент 3: Sensirion

4.2. Технологический аудит идеи проекта

Таблица 4.3 Технологическая осуществимость идеи проекта

п / п	идея проекта	Технологии реализации	наличие технологий	доступность технологий
.	Изготовление сенсоров для создания измерительных устройств	Анизотропное травление кремния; Травление жертв. слоя; формирование слоя SiO ₂ ;	имеющаяся	доступно

		Напыление металл. Слов Al,Ni,Au;Получе ние поликристалл. кремния;фотоли тография		
Выбранная технология реализации идеи проекта:Комплексная				

4.3. Анализ рыночных возможностей запуска стартап-проекта

Таблица 4.4. Предварительная характеристика потенциального рынка стартап-проекта

п / п	Показатели состояния рынка (наименование)	характеристика
	Количество главных игроков, от	22
	Общий объем продаж, ус.ед / год	25 млн / год
	Динамика рынка (качественная оценка)	растет
	Наличие ограничений для входа (указать характер ограничений)	Создание крупного производства
	Специфические требования к стандартизации и сертификации	требует
	Средняя норма рентабельности в отрасли (или по рынку),%	300%

Рынок является привлекательным для вхождения.

Таблица 4.5. Характеристика потенциальных клиентов стартап-проекта

№ п / п	Потребность, формирует рынок	Целевая аудитория (целевые сегменты рынка)	Различия в поведении различных потенциальных целевых групп клиентов	Требования потребителей к товару
	Увеличение точности, чувствитель- ности,надёж- ности	Компании,имеющие дело с расходом жидкостей и газов	-	Товар имеет высокие характеристики при измерении газовых сред.

Таблица 4.6. факторы угроз

№ п / п	фактор	содержание угрозы	Возможная реакция компании
1.	Наличие квалифицированны х кадров	Продукт является наукоемким поэтому нужны люди с определенными навыками	Поиск персонала в научно- исследовательских институтах и организациях
2.	Потребность в ресурсах	Для создания продукта требуется техническое обеспечение и определенные условия для тестирования	Заключение договоров с поставщиками ресурсов и аренда помещений для изготовления и тестирования продукта

		работоспособности	
--	--	-------------------	--

Таблица 4.7. факторы возможностей

№ п / п	фактор	содержание возможности	Возможная реакция компании
1.	конкуренция	Побуждает разрабатывать и производить новые продукты, улучшать метод производства	Улучшение характеристик товара
2.	спрос	Существование устойчивого спроса означает, что большинство клиентов заинтересованы в улучшении технологии	Улучшение характеристик товара

Таблица 4.8. Ступенчатый анализ конкуренции на рынке

Особенности конкурентной среды	В чем проявляется данная характеристика	Влияние на деятельность предприятия (возможные действия компании, чтобы быть конкурентоспособной)
1. По типу конкуренции Полиполия	На рынке присутствует большое количество компаний	Повышать качество товара за счет использования передовых технологий и привлечение

		квалифицированного персонала
2. По уровню конкурентной борьбы Международный	Адрес фирмы не ограничивается территориально;	Создавать сайт компании
3. По отраслевому признаку Внутриотраслевая	Экономическая борьба между различными товаропроизводителями, действующих в одной отрасли экономики, производящие и реализующие одинаковые товары, удовлетворяющие одну и ту же потребность, но имеют различия в производственных затратах, качестве, цене.	Следить за продуктами конкурентов
4. Конкуренция по видам товаров: Товарно-видовая	Конкуренция между товарами одного вида	Улучшать качество товара
5. По характеру конкурентных преимуществ - ценовая	Предусматривает продажу продукции по более низким ценам, чем конкуренты.	Продавать товар по низкой цене.
6. По интенсивности - немарочные	Роль торговой марки незначительна	Реклама товара

Таблица 4.9. Анализ конкуренции в отрасли по М. Портеру

составляющие анализа	Прямые конкуренты в отрасли	потенциальные конкуренты	поставщики	клиенты	Товары-заменители
	SensorTechnics Honeywell	Нет	Товар продается непосредственно разработчикам и	Требования к качеству и долговечности	Есть
Выводы:	Интенсивность достаточно высока, конкуренты уже давно на рынке	Нет	Поставщику не диктует условия работы на рынке	Товар должен быть качественным и долговечным	

Для того, чтобы быть конкурентоспособным на рынке для разработки товара нужно привлекать высококвалифицированных специалистов в области науки и инженеров для улучшения качества товара.

Таблица 4.10. Обоснование факторов конкурентоспособности

№ п / п	фактор конкурентоспособности	Обоснование (наводнения факторов, оказывающих фактор для сравнения конкурентных проектов значимым)
1.	Степень улучшения характеристик сенсора.	Никто из конкурентов не имеет данного фактора, имеет достаточно большое значение

		для сенсоров
2.	Качество разработки с точки зрения показателей качества и долговечности	Продукт должен выдавать стабильно высокий процент распознавания в различных средах.
3.	Наличие научных ресурсов	Для улучшения качества продукции и технологического пути нужны научные ресурсы
4.	Экономический (цена товара)	Цена товара не должна быть слишком высока, чтобы найти потенциальных покупателей.

Таблица 4.12. SWOT-анализ стартап-проекта

Сильные стороны: Степень улучшения характеристик сенсора.	Слабые стороны: Экономический (цена товара)
возможности: большая чувствительность сенсора а также лучшая селективность;	Угрозы Увеличение себестоимости товара за счет увеличения стоимости ресурсов и компонентов

Таблица 4.13. Альтернативы рыночного внедрения стартап-проекта

№ п / п	Альтернатива (ориентировочный комплекс мероприятий)	Вероятность получения ресурсов	сроки реализации
---------------	--	-----------------------------------	------------------

	рыночного поведения		
1.	Поиск компаний сбыта, поиск инвесторов, поиск научных ресурсов, налаживание производства, выход на рынок	70%	3 года
2.	Поиск инвесторов, поиск компаний сбыта, налаживание производства, поиск научных ресурсов, выход на рынок	60%	4 года

Избрана альтернатива № 1.

4.4. Разработка рыночной стратегии проекта

Таблица 4.14. Выбор целевых групп потенциальных потребителей

№ п / п	Описание профиля целевой группы потенциальны х клиентов	Готовность потребителе й принять продукт	Ориентировочн ый спрос в рамках целевой группы (сегмента)	Интенсивно сть конкуренци и в сегменте	Просто та входа в сегмен т
1.	Частные предприятия, частные лица Государствен ные предприятия	готовые	высокий	высокая	Средня я
Какие целевые группы избраны: избран целевую группу №1.					

Таблица 4.15. Определение базовой стратегии развития

п / п	Выбранная альтернати ва развития проекта	Стратегия охвата рынка	Ключевые конкурентоспособн ые позиции в соответствии с выбранной альтернативы	Базовая стратегия развития
1.	1	За счет больших возможностей по объемам сбыта товаров	Затраты на производство	Стратегия лидерства на характеристиках

		(портфеля заключенных контрактов на поставку) и производительности предприятие может добиться меньших затрат		
--	--	--	--	--

Выбрана стратегия лидерства на характеристиках.

Таблица 4.16. Определение базовой стратегии конкурентного поведения

№ п / п	Есть проект «первопроходцем» на рынке?	Будет ли компания искать новых потребителей, или забирать существующих у конкурентов?	Будет ли компания копировать основные характеристики товара конкурента, и какие?	Стратегия конкурентного поведения
1.	нет	да	Да, показатели долговечности	вызов лидера

Таблица 4.17. Определение стратегии позиционирования

п / п	Требования к товару целевой аудитории	Базовая стратегия развития	Ключевые конкурентоспособные позиции собственного стартап-проекта	Выбор ассоциаций, которые должны сформировать комплексную позицию собственного проекта (три ключевых)
1.	Высокая чувствительной, время отклика, Надежность, долговечность	Лидерство на характеристиках	Степень улучшения характеристик сенсора.	Оптимальное соотношение цена / качество, оптимизированное производство, сотрудничество.

4.5. Разработка маркетинговой программы стартап-проекта

Таблица 4.18. Определение ключевых преимуществ концепции потенциального товара

№ п / п	потребность	Выгода, которую предлагает товар	Ключевые преимущества перед конкурентами (существующие или, что нужно создать)
1.	Улучшение характеристик сенсора	Увеличение чувствительности, надежности и времени отклика	Увеличение чувствительности, надежности и времени отклика

Таблица 4.19. Описание трех уровней модели товара

уровни товара	Сущность и составляющие
И. Товар по замыслу	Чувствительные элементы сенсора для определения теплофизических параметров газовой среды
ИИ. Товар в реальном исполнении	Свойства / характеристики
	1. Повышение чувствительности 2. Цена 1000 у.е. 3. Функциональность 4. Долговечность.
	Качество: долговечность 5 год,
	Упаковка: чип
	Марка "-"
ИИИ. Товар с подкреплением	К продаже гарантия.
	После продажи: доставка, обслуживание.

Таблица 4.20. Определение границ установления цены

№ п / п	Уровень цен на товары- заменители	Уровень цен на товары- аналоги	Уровень доходов целевой группы потребителей	Верхняя и нижняя границы установления цены на товар / услугу
	-	900 - 1200 у.е.	13000 у.е. и выше	900 - 1200 у.е. / м2

Таблица 4.21. Формирование системы сбыта

№ п /	Специфика закупочной	Функции сбыта, которые должен	Глубина канала	Оптимальная система сбыта
----------	-------------------------	----------------------------------	-------------------	------------------------------

п	поведения целевых клиентов	выполнять поставщик товара	сбыта	
	Заказ товара на сайте или непосредственно у разработчиков	Установление контакта, информирование, разделение, хранения, сортировки	Канал нулевого уровня	Производитель непосредственно сбывает продукцию покупателям

Таблица 4.22. Концепция маркетинговых коммуникаций

п / п	Специфика поведения целевых клиентов	Каналы коммуникаций, которыми пользуются целевые клиенты	Ключевые позиции, выбранные для позиционирования	Задача рекламного сообщения	Концепция рекламного обращения
	Применение сенсора при технологических процессах расхода газа.	Прямые - канал коммуникации, когда информация передается непосредственно от информатора	Увеличение чувствительности, надежности а также уменьшение времени отклика.	Распространение знаний о пред-ство и характеристики товара среди возможных компаний-	Обращение основано на различии между рекламированными товаром и тем, что предлагают конкуренты. Обращение основывается на

		к информирова нного лица		клиентов. Обращение внимания на отсутствие изменения техноло- ного процесса при приме- ни товара.	том или ином мотивационном подходе, призванном влиять на потребительские предпочтения покупателей
--	--	--------------------------------	--	---	--

4.6 Выводы по главе

Рыночная коммерциализация данного сенсора приемлема из-за высокой цены у конкурентов и присутствии конкурентных характеристик товара. Также, рынок сенсоров развивается очень быстро, что повысит шансы привлечь финансирование.

Основные результаты и выводы

В работе получены следующие результаты:

1. Проведен анализ научно-технической литературы, анализ конструкций современных сенсоров на основе теплоизолированных структур;
2. Проведен анализ методов определения теплофизических параметров сред с использованием первичных преобразователей на технологии МЭМС;
3. В работе показана возможность реализации виртуальных приборов в программной среде LabVIEW на аппаратной платформе NI ELVIS II для исследования параметров газовой среды с использованием ТРП, изготовленных по технологии МЭМС. Разработана структурная схема многофункционального сенсора для измерения теплофизических параметров среды на основе лабораторной платформы для разработки виртуальных устройств NI ELVIS II в среде программирования LabVIEW 8.6. Использование встроенного функционального генератора, осциллоскопа и других встроенных инструментов SignalExpress позволяет реализовать весь комплекс исследований без использования других измерительных приборов.

Исследованный в работе тип терморезисторных первичных преобразователей позволяет исследовать теплоемкость и теплопроводность среды как непосредственно измеряемые параметров с переходными процессами установления температуры. В перспективе при математической обработке непосредственного результата измерений возможен расчет других параметров среды, функционально связанных с теплоемкостью и теплопроводностью.

Минимальный временной интервал между опросами встроенного осциллографа в составе NI ELVIS II на уровне 100 мкс с возможностью измерения электрического сопротивления с погрешностью не более 1% при подаче импульса со встроенного функционального генератора порядка 100 мВ позволяет исследовать тепловые переходные процессы в теплоизолированной структуре (разогрев терморезистора), изготовленной по

технологии МЭМС. Возможности виртуального инструмента по сохранению результатов измерения в численной форме (формат таблицы Microsoft EXCEL) позволяют исследователю реализовать нужную методику математической обработки измерений. Именно эти преимущества является бесспорным причиной выбора и использования платформы NI ELVIS II для проведения таких исследований.

В работе также сформулированы рекомендации для дальнейшей разработки виртуального измерительного инструмента для проведения экспериментальных исследований и их анализа.

Перечень литературных источников:

1. Патент США №US8225652B2 “Thermal flow meter measuring flow rate based on temperature difference measurement and driving energy of the heater”, 24.07.2012, Мураока М.
2. Патент США №US2009/0164163A1, “Integrated micromachined mass flow sensor and methods of making the same”, 25.06.2009, Джао Фен Венг.
3. Патент США №US7780342B2 “Micromachined gas and liquid concentration sensor and method of making the same”, 24.08.2010, Джао Фен Венг.
4. “Honeywell Sensing & Control Catalog”, спецификация первичных преобразователей серии AWM2000, С. 68-70.
5. “Honeywell Sensing & Control Catalog”, спецификация первичных преобразователей серии AWM3000, С. 71-75.
6. “Sensirion Product Information January 2012 SFC4000 Ultra-Fast CMOSens® Chip Mass Flow Controller For Gases”, спецификация сенсоров потока газа.
7. “Sensirion Product Information November 2008 CMOSens® SFC3000 Digital OEM Mass Flow Controller for Gases”, спецификация сенсора потока газа.
8. “SensorTechnics Product Catalog”, Low differential pressure sensor LBA series, спецификация.
9. “Application Advantages of LBA Differential Pressure Sensors Due to Their Very High Pneumatic Impedance”, казания к применению.
10. Grudin O.M., Frolov G.A., Katsan I.I., Lupina B.I. “Thermal microsensor with a.c. heating for gas-pressure measurements” // Sensors and Actuators A, -62, (1997), P.571-575.

11. Борисов О.В., Заворотний В.Ф., Лупина Б.І., Осінов С.М., Сорохтіна Г.Л. «СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ ГАЗІВ ЗА ФАЗОВИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЕПЛОВОЇ ХВИЛІ», науково-технічний журнал черкаського державного технологічного університету «Вісник», С.161-163, 2007.
12. “NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite (NI ELVISTM)”, техническая документация и инструкция пользователя, National Instruments, 2008.
13. “NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series (NI ELVISTM II Series)”, инструкция пользователя, National Instruments, июнь 2011.
14. “NI ELVIS II Series Specifications”, спецификация, National Instruments, 2009.
- 15.1. Зайцев Ю.В. Полупроводниковые резисторы. – М.: Энергия, 1969. – 26 с.
- 16.2. Шашков А.Г., Касперович А.С. Динамические свойства цепей с термисторами. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 210 с.
- 17.3. Мэклин Э.Д [Masklen E.D.]. Терморезисторы: пер. с англ. / Под общей редакцией К.И. Мартюшева. – М.: Радио и связь, 1983. – 207 с.
18. Бохов О.С.-- ФИЗИКО - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ МИКРОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ , АВТОРЕФЕРАТ, Санкт-петербург 2010
19. Козлов А.Г.--Моделирование процессов в микрофизических теплосенсорах , АВТОРЕФЕРАТ . Санкт-Петербург 2015
20. А.В. Борисов , И.С. Дейнека , Б.И. Лупина –Исследование динамических характеристик микромеханических терморезисторных преобразователей физических параметров жидкости и газа на

- аппаратной платформе NI ELVIS II в программно й среде Lab VIEW
Прикладная радиоэлектроника, 2010, Том 9, № 4
21. C. Falco , A. De Luca , S. Safaz , F. Udrea – 3-D Multiphysics Model of Thermal Flow Sensors. Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Cambridge
 22. Louis Vessot King – Improved Means for Determining the Rate of Flow of Fluids. 1914
 23. Бланк, С. Стартап. Настольная книга основателя / С. Бланк, Б. Дорф ; пер. с англ. Т. Гутман, И. Окунькова, Е. Бакушева. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2014. – 614 с.
 24. Article features an overview of NI ELVIS [Электронный ресурс] <http://www.ni.com/white-paper/8599/en>.
 25. Терморезистивные датчики. [Электронный ресурс] // datchikisensor.narod.ru: датчики и сенсоры он-лайн журнал. – URL: <http://datchikisensor.narod.ru/0128.html> (дата обращения: 21.11.2015).
 26. Датчики температуры. [Электронный ресурс] // [devicesearch.ru](http://www.devicesearch.ru) поиск контрольно измерительных приборов и датчиков. – URL: <http://www.devicesearch.ru/article/datchiki-temperature> (дата обращения: 21.11.2015).
 27. Лабораторный комплекс ELVIS II
http://ikit.edu.sfu-kras.ru/lab_p/pages/elvis.html
 28. Bridget Cunningham – Описание Поведения Теплового Расходомера
<https://www.comsol.ru/blogs/describing-the-behavior-of-a-thermal-mass-flow-sensor/>
 29. Дрейпер, У. Стартапы : профессиональные игры Кремниевой долины / У. Дрейпер ; предисл. Э. Шмидта ; пер. с англ. В. Егорова. – Москва : Эксмо, 2012. – 378 с.
 30. Коэн, Д. Стартап в Сети : мастер-классы успешных предпринимателей / Д. Коэн, Б. Фелд ; пер. с англ. М. Иутина. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2013. – 337 с.

31. Маллинс, Дж. Поиск бизнес-модели : как спасти стартап, вовремя сменив план / Дж. Маллинс, Р. Комисар ; пер. с англ. М. Пуксант и Е. Бакушевой. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2012. – 329 с.
32. Робемед, Н. Самые интересные стартапы 2013 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.forbes.ru/svoi-biznes-photogallery/startapy/248976-samye-interesnye-startapy-2013-goda/photo/1>
33. Статистика смертности и советы по безопасности для стартапов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vc.ru/p/startup-eset>
34. Статистика указала на условия для появления стартапов, успешных как Google и Facebook [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://naked-science.ru/article/sci/statistika-ukazala-na-usloviya>
35. Тиль, П. От нуля к единице : как создать стартап, который изменит будущее / П. Тиль, Б. Мастерс; перевод с англ. – Москва : Альпина паблишер, 2015. – 188 с.
36. Харниш, В. Правила прибыльных стартапов : как расти и зарабатывать деньги / В. Харниш ; пер. с англ. В. Хозинского. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2012. – 279 с.
37. Экланд С. Ангелы, драконы и стервятники : как привлечь правильных инвесторов в свой стартап и сохранить бизнес / С. Экланд ; пер. с англ. О. Терентьевой. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2011. – 275 с.
38. Цибульов П. М. Управління інтелектуальною власністю : монографія/ Цибульов П. М., Чеботарьов В. П., Зінов В. Г. , Суїні Ю., за ред. П. М. Цибульова. – К. : «К. І. С.», 2005. – 448 с.
39. Квашнин А. Как управлять портфелем технологий и интеллектуальной собственностью : серия методических материалов «Практические руководства для центров коммерциализации технологий» / под рук. П. Линдхольма, проект EuropeAid «Наука и коммерциализация технологий», 2006. – 60 с.
40. Квашнин А. Как продвигать проекты коммерциализации технологий : серия методических материалов «Практические руководства для

центров коммерциализации технологий» / М. Катешова, А. Квашнин, под рук. П. Линдхольма, проект EuropeAid «Наука и коммерциализация технологий», 2006. – 52 с.

41. Петруненко А. Оценка коммерческой привлекательности проекта [Электронный ресурс] // Технологический бизнес. – 1999. – № 2. Режим доступа: <http://www.techbusiness.ru/tb/archiv/number2/page01.htm>
42. Лупина Б.И. Микромеханические терморезисторные преобразователи: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Киев 2017